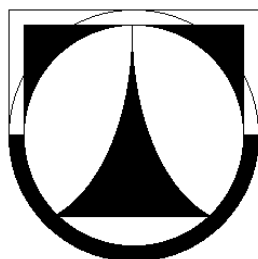


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



UHLÍKOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY
S ANORGANICKOU MATRICÍ

THE CARBON COMPOSITE MATERIALS
WITH THE INORGANICAL MATRIX

LIBEREC 2008

PAVLÍNA MUNZAROVÁ

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 12. května 2008

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji touto cestou vedoucímu diplomové práce panu Ing. Vladimíru Kovačičovi za odborné konzultace, podnětné rady a připomínky. Dále mé poděkování patří konzultantovi panu Ing. Otovi Hausenblasovi, za pomoc a poskytnutí materiálů k vypracování práce. Také děkuji firmě Kamenia s.r.o zastoupená panem Pavlem Baxou, za rady při výrobě vzorků a panu Ladislavu Kuklíkovi za vyrobení.

V neposlední řadě poděkování patří hlavně mé rodině za pomoc a podporu, kterou mi dávali po celou dobu mého studia.

Anotace

Téma: Uhlíkové kompozitní materiály s anorganickou maticí

Hlavní náplní této diplomové práce je sledování kompozitů, zejména změna vlastností kompozitů s různým obsahem uhlíkových vláken při různé době stáří.

Rešeršní část diplomové práce obsahuje základní charakteristiky a rozdělení kompozitů, používaných vláken pro kompozity a běžně používaných matic pro tyto materiály. Dále je zde popsán geopolymery, který je v této práci použit jako matrice. Závěrem rešeršní části jsou popsány vybrané druhy výroby kompozitních dílů.

Experimentální část popisuje použité materiály pro vyrobené vzorky. Dále je v této části zpracováno měření akustické pohltivosti, elektrické vodivosti, mechanických vlastností a termické vodivosti kompozitních dílů s uhlíkovými vlákny v geopolymerní matici. Byly modelovány závislosti veličin na obsahu uhlíkových vláken a na stáří geopolymery.

Annotation

Thesis: The carbon composite materials with the inorganical matrix

The principal content of the dissertation work is to watch how the characteristics of the composite changes at different periods with different amount of the carbon fibres.

The theoretical part of the dissertation work includes the fundamental characteristics and classification of the composites, the fibres used for the composites and the common use of matrix for these materials. Further on, the geopolymery is described, which is used as the matrix in the dissertation work. There are selected types of composite production described in the final part of the theoretical part.

The experimental part of the dissertation work describes the materials used for the samples made. It is worked on the measuring of an acoustic resistance, an electric conductivity, mechanical properties and a thermal conductivity of the composites with the carbon fibres in the geopolymery matrix. Dependencies quantities were modelled for volume carbonic fibres and for age geopolymery.

Klíčová slova

Kompozit

Uhlíkové Vlákna

Geopolymer

Akustická pohltivost

Elektrická vodivost

Mechanické vlastnosti

Tepelná vodivost

Key words

Composite

Karbon fibre

Geopolymer

Acoustic absorption

Electrical conductivity

Mechanical characteristics

Thermal conductivity

Obsah

Obsah	7
Úvod	11
2. Rešeršní část	12
2.1 Kompozity.....	12
2.1.1 Definice	12
2.1.2 Historie	13
2.1.3 Rozdělení	14
2.2 Vystužující vlákna.....	18
2.2.1 Skleněná vlákna	18
2.2.2 Křemenná vlákna.....	20
2.2.3 Uhlíková vlákna	21
2.2.3.1 Postup výroby uhlíkových vláken	22
2.2.3.1 Vlákna z polyakrylonitrilu.....	23
2.2.3.3 Vlákna ze smol.....	24
2.2.3.4 Uhlíkové nanotrubičky (CNT)	25
2.2.3.5 Uhlíková nanovlákna.....	26
2.2.3.6 Úprava uhlíkových vláken	26
2.2.3.7 Vlastnosti uhlíkových vláken	27
2.2.3.8 Použití uhlíkových vláken.....	27
2.2.4 Polymerní vlákna	28
2.2.4.1 Aromatické polyamidy	29
2.2.4.2 Vysoce pevná polyetylenová vlákna.....	30
2.2.4.3 Aromatické polyestery.....	31
2.2.4.4 PBO vlákna.....	32
2.2.4.5 PBI vlákna.....	32
2.2.5 Borová vlákna.....	32
2.2.6 Čedičová vlákna	33
2.2.7 Keramická vlákna	34
2.2.8 Přírodní vlákna z rostlin	35
2.2.9 Přírodní minerální vlákna.....	36
2.2.10 Proteinová vlákna	36
2.2.11 Kovová vlákna	36
2.3 Matrice	38
2.3.1 Rozdělení	38
2.3.2 Reaktoplasty.....	39

2.3.2.1 Nenasycené polyesterové matrice (UP)	39
2.3.2.2 Vinylesterové pryskyřice (VE)	40
2.3.2.3 Epoxidové pryskyřice (EP)	40
2.3.2.4 Fenolické pryskyřice (PF).....	41
2.3.3 Termoplasty.....	41
2.3.4 Geopolymerní matrice.....	42
2.4 Výroba kompozitů.....	44
3. Experimentální část.....	48
3.1 Charakteristika použitých materiálů	48
3.1.1 Uhlíková vlákna firmy Kureha	48
3.1.2 Geopolymerní matrice.....	49
3.1.3 Postup výroby	50
3.1.4 Rozměry použitých vzorků.....	52
3.2 Experimenty	53
3.2.1 Akustická pohltivost	53
3.2.2 Elektrická vodivost	59
3.2.3 Mechanické vlastnosti.....	64
3.2.4 Tepelná vodivost.....	70
4. Závěr.....	75
Použitá literatura	77
Seznam příloh	80

Seznam použitých symbolů

a	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	měrná teplotní vodivost
b	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}^{-1}]$	koeficient tepelné aktivity
c	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
E	$[\text{Pa}]$	modul pružnosti
E_i	$[\text{J}]$	energie dopadající na plochu
E_r	$[\text{J}]$	energie plochou odražená
E_a	$[\text{J}]$	energie plochou pohlcená
F	$[\text{N}]$	síla
G	$[\Omega]$	elektrická vodivost
h	$[\text{m}]$	tloušťka materiálu
$H1$	$[\text{Hz}]$	frekvenční přenosová funkce
Hi	$[\text{Hz}]$	frekvenční přenosová fce spojená se složkou signálu od zdroje
Hr	$[\text{Hz}]$	frekvenční přenosová fce spojená se složkou odraženého signálu
HC	$[\text{Hz}]$	koeficient frekvenční přenosové funkce
I	$[\text{A}]$	elektrický proud protékající vodičem
l	$[\text{m}]$	vzdálenost elektrod
o	$[\text{m}]$	střední obvod (resp. délka elektrod)
Pi	$[\text{Hz}]$	signál ze zdroje
Pr	$[\text{Hz}]$	signál odražený
r	$[\text{W}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2]$	plošný odpor vedení tepla
R	$[\Omega]$	elektrický odpor
Rs	$[\Omega]$	povrchový elektrický odpor
S	$[\text{m}^2]$	plocha
Tg	$[\text{°C}]$	teplota zesklínění

U	[V]	elektrické napětí
α	[-]	činitel zvukové pohltivosti
Δl	[m]	protažení do přetrhu
ε	[%]	tažnost
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná vodivost
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
ρ_s	[Ω]	povrchová rezistivita
σ	[Pa]	tahové napětí

Úvod

Během vývoje lidské společnosti se člověk naučil používat nejrůznější materiály, jako jsou kámen, bronz, železo, dřevo, keramika a jiné přírodní suroviny. Podle nejčastěji používaných materiálů byly pojmenovány i epochy lidstva. Od doby kamenné, kdy se lidé naučili používat kamene jako nástroje k práci, k době bronzové, kdy lidé začali používat slitiny mědi a cínu, až po dobu železnou, kdy lidé začali využívat železo pro výrobu nástrojů a zbraní. S postupem času byl vývoj používaných materiálů posunován stále vpřed vzhledem k potřebám člověka, jenž neustále zvyšoval svoje potřeby a úroveň.

I v současné době rostou nároky na úroveň, použití a funkčnost materiálů. Tímto vývojem vznikají nové materiály a technologie zpracování materiálů a surovin. Názorně lze tento vývoj dokumentovat u sportovních potřeb, jako jsou například tenisové rakety. Od původních dřevěných raketových ráků se přes hliníkové rámy došlo ke slitinám titanu s uhlíkem, které dávají tenisovým raketám lehkost a pevnost. Hlavními přednostmi těchto nových materiálů jsou odlehčená váha konstrukce, vyšší mechanická a fyzikální odolnost. Tyto vlastnosti jsou ve většině případů dosaženy použitím kompozitního materiálu.

Kompozitní materiál se skládá ze dvou a více složek, z matrice a výztuže. Tyto postupy jsou lidstvu známy již od dob starověkého Egypta, kdy se vyráběly kamenné cihly na stavbu pyramid. Lidé při stavbě svých obydlí vytvářeli kompozitní materiál, když například rákos obalovali hlínou. Vývoj těchto kompozitních materiálů šel rychle kupředu a svými vlastnostmi předčil materiály vytvořené přírodou. Dříve byly kompozity vyvíjeny pro letecké a kosmonautické odvětví a nyní se tyto materiály vyskytují ve spoustě jiných oborů, jako jsou například zdravotnictví, stavebnictví, sport, automobilový a strojní průmysl a další odvětví.

Při navrhování nových materiálů je nutno pečlivě zvážit výhody surovin používaných v kompozitech a výsledné vlastnosti, které jsou potřebné pro navržený a získávaný materiál. Je důležité navrhovat kompozity se zlepšenými výslednými vlastnostmi, než jsou vlastnosti použitých jednotlivých složek. V praxi se kompozitní materiály navrhuje pro předem specifikované výsledné vlastnosti, které jsou požadovány, nebo se navrhuje pro splnění určené funkce v praxi.

Cílem této diplomové práce je zjištění vlastností kompozitu v závislosti na době stárnutí materiálu. Teoretická část definuje a dělí kompozity, používané materiály a vybrané druhy výroby. Experimentální část obsahuje popis použitých materiálů a opakovaná měření mechanických a fyzikálních vlastností se stejným časovým odstupem.

2. Rešeršní část

2.1 Kompozity

2.1.1 Definice

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází), které jsou navzájem rozlišitelné a oddělné rozhraním. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá **výztuž**. V porovnání s matricí má výztuž obvykle výrazně vyšší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost,...) a hlavním cílem vyztužení je tedy zlepšení uvedených vlastností. Spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá **matrice**. Hlavní funkce matrice jsou:

- udržet vlákna ve správných pozicích
- pomáhat distribuovat napětí
- chránit vlákna před poškozením abrazí
- kontrolovat elektrické a chemické vlastnosti
- zajišťovat interlaminární pevnost.

Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky:

- podíl výztuže musí být větší než 5 %
- vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- kompozit musí být připraven smícháním složek[1,2,3].

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. **synergismus**, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností.

Typickým příkladem **synergického chování** je kompozit složený z keramické matrice vyztužené keramickými vlákny. I když jsou jak matrice, tak vlákna samostatně velmi křehká, výsledný kompozit je charakteristicky určitou mírou

houževnatosti, tzn. odolností proti náhlému křehkému porušení. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností[4].

2.1.2 Historie

Historie počátků kompozitů sahají až do starověkého Egypta – stavební cihly

19. století – výztuž zdiva ocelovými tyčemi – předepjatý beton

1908 Baekeland – fenolická pryskyřice (PF) zpevněná dřevitou moučkou

počátek 20. století – fenolové pryskyřice + azbestová vlákna

sklolamináty (skleněná vlákna + reaktoplast)

1920 – vrtule, tkanina a PF pryskyřice

1942 – první laminátový člun (letectví, elektronika)

1946 – metoda vinutých vláken

1950 – zavedení vinutých vláken do raketové techniky

1960 – vlákna z vysokopevnostního uhlíku

1970 – kompozity s kovovými matricemi (bor, hliník, ...)

70.léta – expanze kompozitních materiálů v letectví, automobilovém průmyslu, sportovním průmyslu, aj.

Historie uhlíkových kompozitů:

1957 - první uhlíkové vlákno z viskózy v USA

1961 - první uhlíkové vlákno z PAN v Japonsku

1966 - trysky raketových motorů – 3D tkanina

1971 - začátek komerční výroby uhlíkových vláken z PAN - výroba 12 tun/rok

1978 - export technologie Toray do Union Carbide (USA)

1986 - Torayca T1000 –velmi pevné „středněmodulové“ (IM) vlákno

1990 - prepreg Torayca (vlákna T800 + houževnatá EP)

1992 - začátek výroby uhlíkových vláken z PAN firmy Zoltek[2,3,5].

2.1.3 Rozdělení

Základní rozdělení

- jednoduché (homogenní) – materiál má v každém místě stejné složení a vlastnosti
- složené (heterogenní, kompozitní) – materiál je složený ze dvou nebo více fyzikálně a chemicky odlišných materiálových složek.

Podle velikosti výztuže

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměru.

- **mikrokompozity**: tyto materiály mají v průmyslu největší význam, největší příčné rozměry výztuže (vláken nebo částic) jsou v rozmezí 10^0 až 10^2 μm .
- **Makrokompozity**: tyto materiály obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru 10^0 až 10^2 mm a jsou používány především ve stavebnictví (železobeton, tj. beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty, polymerbetony obsahující drcené kamenivo a pryskyřici). Za makrokompozity lze považovat i plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce (např. chodníky a vozovky).
- **Nanokompozity**: jsou kompozitní materiály s polymerní matricí, které mají rozměr výztuže (délka částice nebo průměr vlákna) v jednotkách nm[1,3].

Podle druhu vláknenného produktu

- rozptýlená vlákna
- sekané prameny – jsou určeny pro přípravu lisovacích a vstřikovacích směsí, prameny jsou nasekány na potřebné délky
- mletá vlákna – mletím lze získat krátká vlákna, použití možné pouze u křehkých vláken
- rovingy – sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutů na metr) pro výrobu profilů tažením (půldruzí) pro navíjení a pro výrobu jednosměrných prepregů
- rovinové tkaniny – tkané z rovingů jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů
- rohože – netkané textile, rouna, tvoří je v rovině ležící nahodile uspořádaná kontinuální nebo na větší délky sekaná vlákna (25-50mm). Jsou spojena polymerními pojivy, rozpustnými v pryskyřicích. Kontinuální vlákna jsou vzájemně propletena a není zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivem.

- prepregy – různě široké role, kotouče obsahující buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož a polymerní matrici. Je to polotovar používaný k získání špičkových polymerních kompozitů.
- voštiny – jsou určeny pro jádra sendvičových konstrukcí s různou výškou, velikostí a tvarem buněk, stěna buňky má tloušťku a vzhled papíru
- distanční tkaniny – vyrábějí se pouze se skleněnými vlákny, dodávají se ve stlačeném stavu s vlákny fixovaným pojivem rozpustným v rozpouštědlové pryskyřici, distanční tkaniny umožňují výrobu tenkých profilů s proměnnou tloušťkou[1].

Podle tvaru

Systém:

- partikulární – částice různého tvaru
- granulační – nemá rozdílné osově rozměry (výstuže plněné částicemi)
- fibrilární – jeden rozměr u částic převažuje (vlákno)
- lamelární – jeden rozměr oproti ostatním je zanedbatelný (destička)(viz obr. 1)

Výstuže:

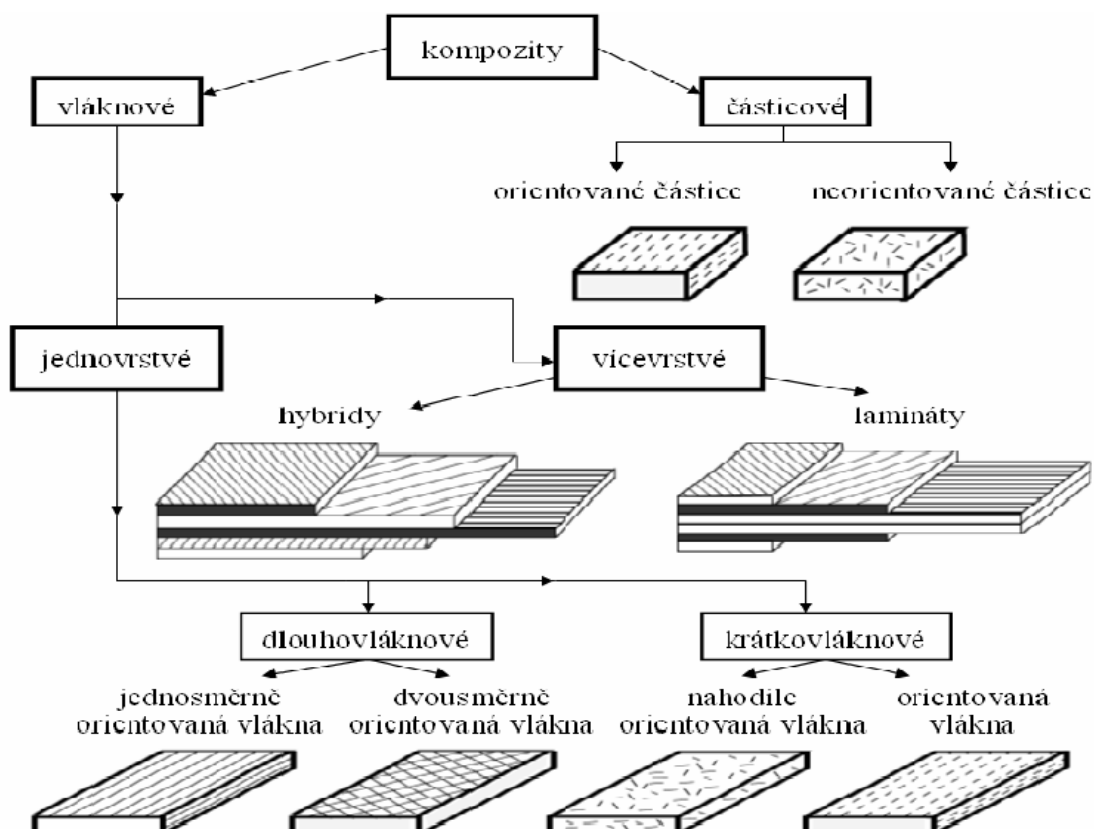
- **disperzní** – obsahují kovy disperzně zpevněné, mohou být segregované – nespojitě (části nejsou ve vzájemném kontaktu), nebo agregované – spojitě, (jednotlivé součásti jsou v přímém kontaktu)
- **částicové** – obsahují obvykle anorganické částice, mikro a nanokompozity, mají izometrický či anizometrický tvar (destičkovité částice) a určitý štíhlostní (aspektivní) poměr l/t , jsou buď pravidelných nebo nepravidelných tvarů
- **vláknové** - a) jednovrstvové
 - diskontinuální vlákna – jednosměrné nebo dvousměrné vystužení
 - kontinuální vlákna – náhodná nebo přednostní orientace
- b) mnohovrstvové
 - lamináty – lamino (vrstva vícevrstvého kompozitu)
 - laminát (vícevrstvý kompozit, materiály složek v každé vrstvě jsou stejné)
 - hybridy – jednotlivé vrstvy mají různé materiálové složení (viz obr. 2)

Podle orientace výztuže

- preferované
- náhodné[1,3,5]



Obr. 1 Tvary vyztužujících vláken[5]



Obr. 2 Rozdělení kompozitů [6]

Podle použitého materiálu

Výztuž:

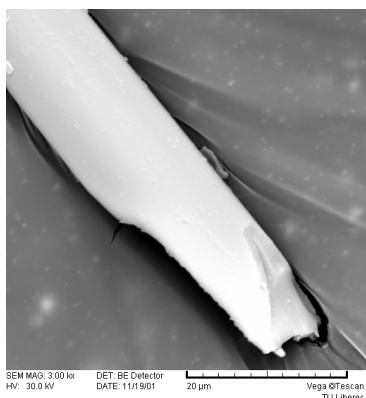
- skleněná vlákna
- křemenná vlákna
- uhlíková vlákna
- polymerní vlákna
- bórová vlákna
- čedičová vlákna
- keramická vlákna
- přírodní vlákna z rostlin
- přírodní minerální vlákna
- proteinová vlákna
- kovová vlákna

Matrice:

- polymerní
- kovová
- keramická
- skleněná, sklokeramická
- uhlíková[1]

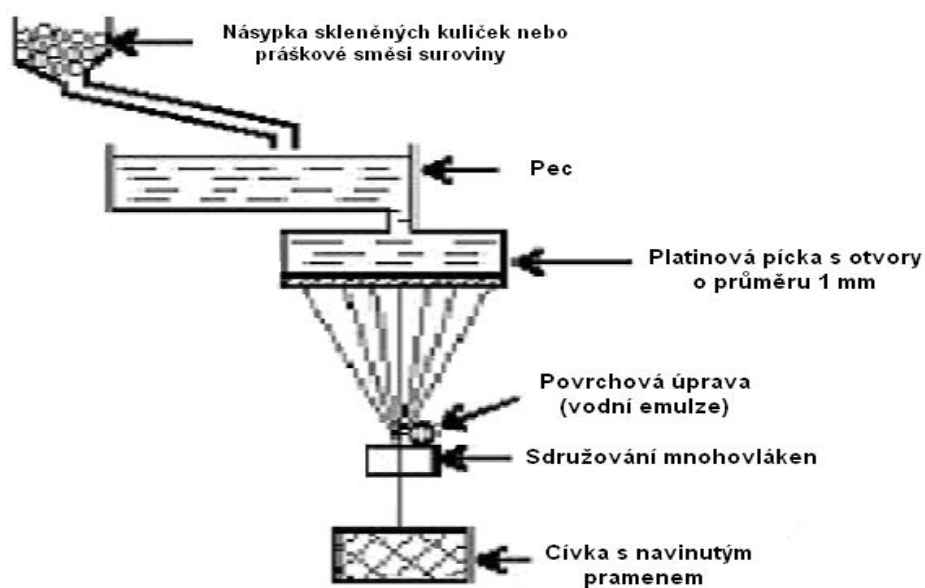
2.2 Vystužující vlákna

2.2.1 Skleněná vlákna



Obr. 3 Lom skleněného vlákna způsobený ohybem[7]

Všechna skleněná vlákna mají silikátový základ SiO_2 + dodatek (oxidy Ca, B, Fe, Al, Mg). Výroba vláken se provádí tažením taveniny příslušné směsi oxidů s velmi malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla vytékajícího z platinových trysek (průměr 1 mm) ve dnu zvláknovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování „monovláken“. Tato vlákna se po povrchové úpravě (sizing) sdružují do pramene a navíjejí na cívku. Navíjecí rychlost je několik tisíc m/min. Sdružením pramenů vzniká roving (pramenec nebo kabílek)(viz obr. 4)[1,8].



Obr. 4 Schéma výroby skleněných vláken[1]

Skla jsou obvykle amorfni. Amorfni strukturu získáváme rychlým chlazením tavenin. Krystalizace se může objevit při dlouhém ohřevu nebo při vyšších teplotách, ale to zase snižuje mechanické vlastnosti (viz obr. 3).

Vlákno se vyznačuje svou izotropií, jež lze najít jen u mála vláknenných materiálů. Vlastnosti ve směru osy jsou stejné jako vlastnosti ve směru kolmém na osu vlákna, pevnost vláken závisí na jejich struktuře. Čím mají skleněná vlákna menší průměry, tím jsou pevnější, na malém povrchu vláken jsou menší defekty. Nejběžnější průměry jsou od 7 do 15 μm . Vlastnosti, jako jsou pevnost a modul, jsou závislé na teplotě. Pevnost silně závisí na zpracovatelských a klimatických podmínkách, klesá při narušení povrchu, ve vlhkém prostředí. Čerstvě vyrobená vlákna mají vysokou absorpci vlhkosti, proto se musí vlákna před použitím vysoušet a musí se skladovat v suchém prostředí.

Pro ochranu vláken se provádí povrchová úprava nanesením tenkého ochranného povlaku, který snižuje tření při zpracování, umožňuje vytvoření chemické vazby mezi povrchem vlákna a matricí, snižuje absorbování podílu vody, má antistatický účinek[1,8].

Podle složení se skla liší v některých vlastnostech. Rozdělujeme na:

- a) E – sklo
- b) S – sklo
- c) C – sklo
- d) AR – sklo

a) E – sklo

- bezalkalické vápenato-hlinito-bóro-křemičité sklo
 - sklo Eutal
 - eutektické složení s nejmenší teplotou tavení
- nejlevnější (70 Kč/kg)
- dobré mechanické vlastnosti, jako jsou pevnost, tuhost
- dobré elektrické vlastnosti – nevodivost, velký povrchový odpor, malé dielektrické ztráty
- dobrá odolnost proti hydrolýze - rozkladu v horké vodě
- odolnost proti atmosferickým vlivům
- sklo používané pro elektrotechniku

b) S – sklo

- větší podíl oxidu křemíku a hliníku než u E - skla

- v porovnání s E – sklem má S - sklo:
 - vyšší pevnost a modul pružnosti
 - nižší hustotu
 - vyšší teplotní odolnost
 - dobrou odolnost v prostředí kyselin
- dražší než E – sklo, protože je potřeba vyšší teplota tavení
- použití S - skla je většinou omezeno jen na aplikace v leteckém průmyslu
- používá se pouze v kompozitech s epoxidovou matricí

c) C – sklo

- vyšší podíl alkálií
- nižší teplota měknutí
- méně pevné - jeho mechanické vlastnosti rychleji klesají s rostoucí teplotou
- vyšší odolnost vůči chemické korozi
 - v prostředí obsahujícím kyseliny větší podíl alkalických prvků zlepšuje odolnost proti rozpouštění
 - v samotné vodě se však alkalické prvky rychle vyluhují

d) AR - sklo

- vysoký obsah oxidu zirkoničitého ZrO_2
- odolnost vůči zásaditému prostředí
- výroba střešních šablon s cementovým pojivem, tzv. „ekologický“ eternit
- náhrada azbestu ve střešních krytinách, obkládacích panelech, stavebních materiálech
- dražší než E – sklo[1,8]

2.2.2 Křemenná vlákna

Výroba křemenných vláken spočívá v rozemletí čistého krystalického křemene, jeho tavení a výroby amorfních křemenných tyčí, ze kterých je po roztavení taženo vlákno.

- vlákno o průměru 9 μm stojí cca 220 \$/kg
- vlákna většího průměru jsou levnější (při průměru 14 μm 130 \$/kg).

Křemenná vlákna pro tepelné izolace mají oproti E vláknům vyšší tepelnou odolnost (teplota měknutí asi 980 °C).

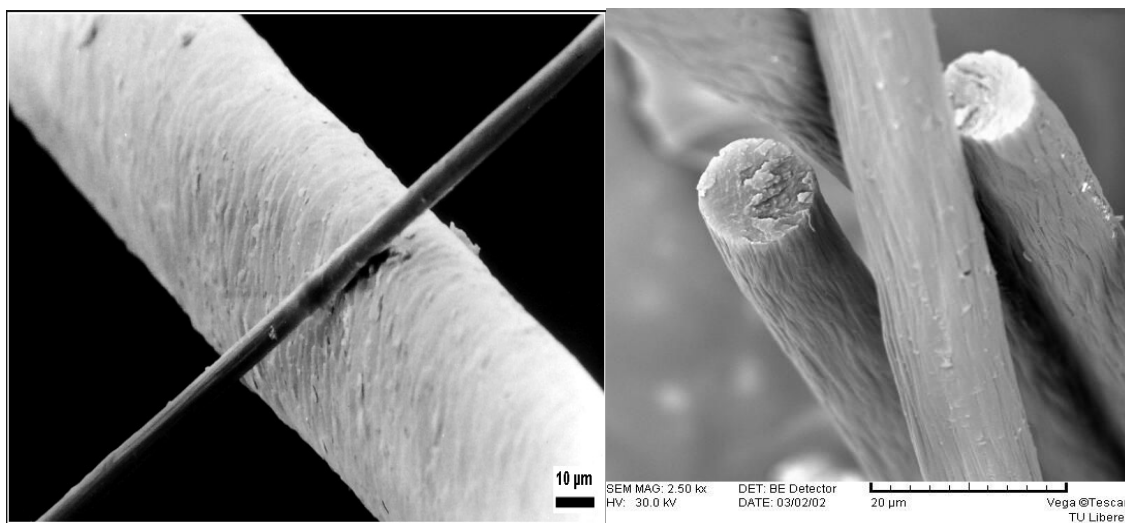
Křemenná vlákna v porovnání s aramidovými vlákny:

- stejně nízká dielektrická konstanta
- o dva řády menší ztrátový faktor při vysokých frekvencích
- menší koeficient délkové roztažnosti
- menší absorpce vlhkosti

Použití:

- tkaniny a rohože pro tepelné izolace
- kryty radarů letadel
- desky tištěných obvodů mobilních telefonů a počítačů (s kyanoesterovými pryskyřicemi)
- pro vojenské „stealth“ letouny
- voštiny s křemennými vlákny („quartz honeycomb“) namísto vláken aromatických polyamidů. Použití těchto voštin v krytech radarů zaručuje výbornou prostupnost pro elektromagnetické vlny (vysokou „radioprůzračnost“)[1,8].

2.2.3 Uhlíková vlákna



Obr. 5 Uhlíkové vlákno porovnáno s lidským vlasem[9] Obr. 6 Lom uhlíkového vlákna[7]

Uhlík existuje v řadě modifikací, od amorfního uhlíku, přes planárně uspořádaný grafit až ke krystalickému diamantu. Uhlík v grafitické formě má hexagonální strukturu a je silně anizotropní. Existují také cyklické fullerénové struktury.

Uhlíková vlákna je souhrnný název pro vlákna obsahující uhlík v různých modifikacích. Speciální podskupinou jsou grafitová vlákna, která vznikají tepelným

zpracováním při teplotách kolem 2400 °C. Vzniká hexagonální vrstevnatá struktura, která má výrazně odlišné vlastnosti[1,8,10].

Obecně se uhlíkové vlákno vyrábí řízenou pyrolýzou vhodných prekurzorů, mezi které patří viskózní vlákna, polyakrylonitrilová vlákna, vlákna na bázi smol a dehtů jako zbytků krakování ropy. Takto můžeme získat celou řadu vláken(viz obr. 5,6):

- standardní uhlíková vlákna: (HS – „High Strength“, AS – „Average Strength“, HT či HTA – „High Tenacity“)
- vlákna s vysokým modulem: (HM – „High Modulus“)
- vlákna se středním modulem (IM – „Intermediate Modulus“)
- vlákna s extrémně vysokým modulem (SHM – „Super High Modulus“, VHM – „Very High Modulus“, UHM – „Ultra High Modulus“)[3,8]

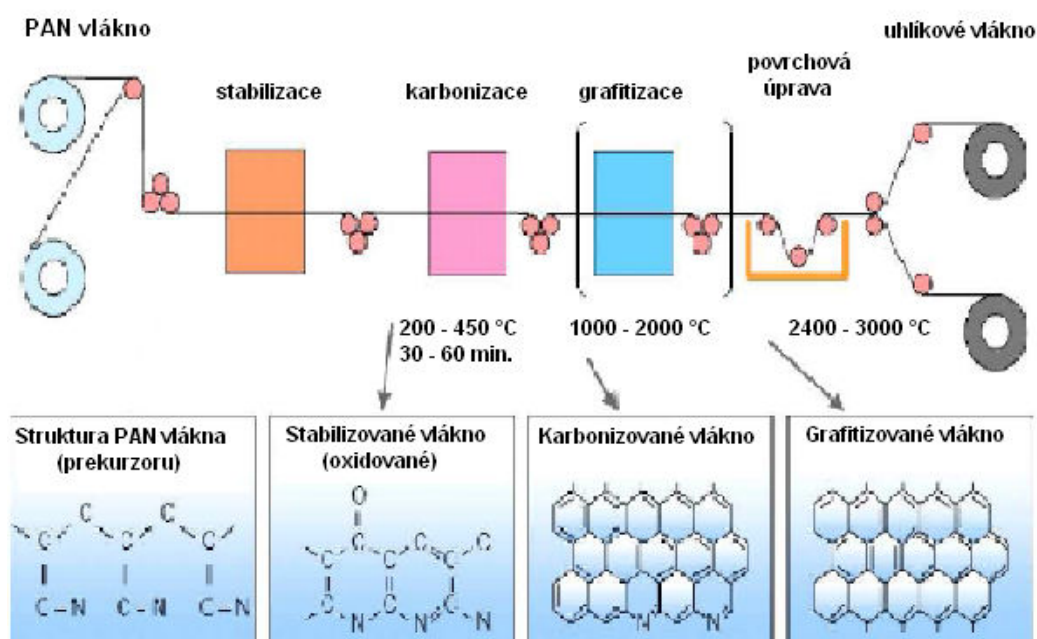
Z pohledu výtěžnosti vláken z prekurzorů jsou na tom nejhůře viskózní vlákna – 20 – 25%. Lepší výtěžnost mají prekurzory z PAN vláken, a to kolem 45 – 50%. Největší výtěžnost je z prekurzorů ze smol, tato výtěžnost dosahuje až 75 – 80%, navíc lze připravit vysoce orientované struktury[8].

2.2.3.1 Postup výroby uhlíkových vláken

Přípravu prekurzoru – příprava vlákna tavným zvlákňováním, nebo zvlákňováním z roztoku. Poté se toto vlákno převádí na uhlíkové vlákno. Struktura a hlavně orientace v prekurzoru se promítá do struktury a pevnosti uhlíkových vláken.

- a) stabilizaci – stabilizace vede ke zčernání vlákna a jeho netavitelné, zesítné struktuře, neboli dochází k preoxidaci. Provádí se na vzduchu zahřáním na poměrně malou teplotu 200 – 450 °C. a dochází k vzájemnému zesítnění makromolekul kyslíkovými můstky.
- b) karbonizaci – jedná se o převedení na uhlíková vlákna. Provádí se v inertní dusíkové atmosféře při teplotách mezi 1000 – 2000 °C. Odstraní se vodík a sníží se obsah kyslíku, přičemž výsledné vlákno obsahuje 85 – 95% uhlíku.
- c) grafitizaci – grafitizace se provádí taktéž v inertní atmosféře (za přítomnosti Ar) při teplotách 2400 – 3000 °C. Dochází ke zvýšení obsahu uhlíku ve vlákně až na 99% a více. Vzniká uspořádaná vrstevnatá grafická struktura a tím i vyšší tuhost vlákna, avšak přírůstkem tuhosti dochází k poklesu pevnosti (zejména u standardních PAN vláken)(viz obr. 7)[1]

Uhlíková vlákna jsou silně inertní, což činí potíže při použití např. zesílení do komponent. Často se používá zdrsňení jejich povrchu oxidací, neboli naleptávání v kyselinách. Vzhledem k malým průměrům 5 -7 μm lze tato vlákna zpracovávat běžným textilním způsobem jako je tkaní, pletení, ovíjení. Podle krystalického uspořádání lze získat vlákna s nízkou, až extrémně vysokou tepelnou vodivostí. Uhlíková vlákna velice dobře vedou elektrický proud, a proto se mohou v řadě aplikací použít místo kovových vodičů[1,8].



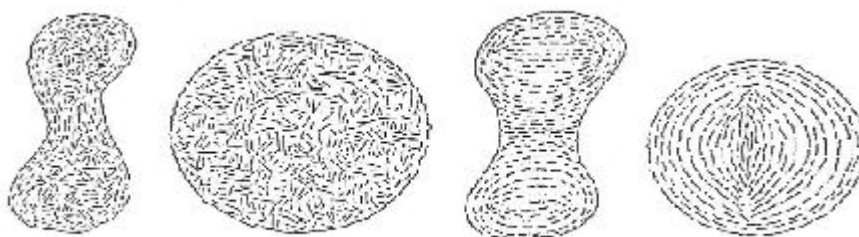
Obr. 7 Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN prekurzoru[3]

2.2.3.1 Vlákna z polyakrylonitrilu

Pro výrobu uhlíkových vláken z PAN vláken se používají vlákna bez modifikačních komponent, jedná se o čistá polyakrylonitrilová vlákna. Stabilizace se provádí za teplot 200 – 220 °C, při napínání vlákna vznikají cyklické žebříčkovité struktury obsahující kyslík. Vnější projevem je zčernání vlákna. Karbonizace probíhá 1000 – 2000 °C, při ní vznikají hexagonální uhlíkové sítě doprovázené uvolněním plyných zplodin. Vlákna na bázi PAN mají menší uspořádanost struktury a mají nižší anizotropii vlastností než vlákna ze smol (viz obr. 8).

Jako aviváže se používá epoxidových pryskyřic, které zlepšují zpracovatelnost a snižují tendenci k povrchové destrukci. Tato aviváž se odstraňuje spálením před použitím těchto vláken jako zesílení do kovových a keramických matric. Vlákna HM

mají pevnost 1,9 – 3,6 GPa, tažnost 0,4 – 0,7% a modul 350 – 540 GPa. Vlákna IM mají pevnost 3 – 4 GPa, tažnost 1,3 – 1,6% a modul 230 – 300 GPa. Vlákna HS mají pevnost 4 – 7 GPa, tažnost 1,7 – 2,4% a modul 235 – 300 GPa[1,8,10].

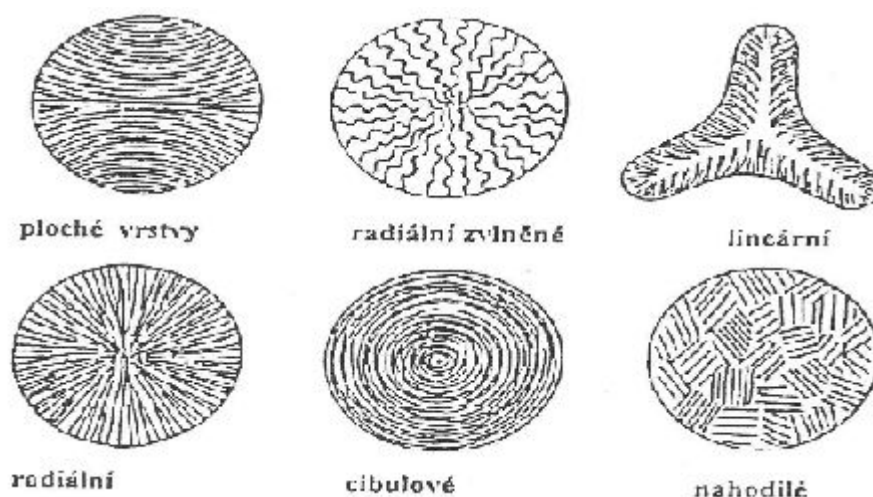


Obr. 8 Uspořádání grafenových rovin ve struktuře PAN vláken[1]

2.2.3.3 Vlákna ze smol

Smoly jsou lacinou surovinou pro výrobu uhlíkových vláken. Používají se smoly složené z petrolejového asfaltu, uhelného dehtu a PVC (tepelně degradovaného). Smoly nemají jednotné složení, obsahují spoustu kondenzovaných benzenových jader oddělených alkylovými řetězci. Asfaltové smoly obsahují velký podíl síry. Smoly na bázi PVC se získávají termickou degradací.

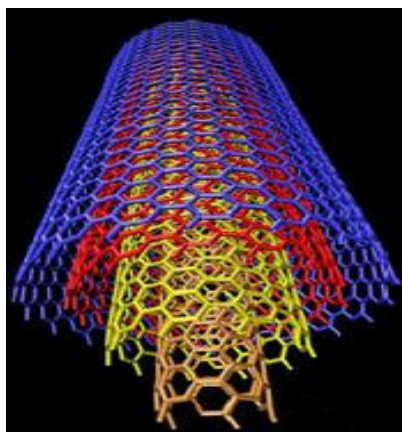
Termickým zpracováním vzniká termoplastická mezofázová smola obsahující nematické kapalně krystalové z pevných tyčinek. Zvlákněje se při rychlosti 3 – 100 m/min. Prekuzované vlákno má průměr 10 – 20 μm , obsahuje protažené anizotropické domény. Při následné oxidaci dochází k zesíťování. Následné operace jako jsou předkarbonizace, karbonizace a grafitizace se provádí v inertní atmosféře. Špičkové typy vláken se při grafitizaci ještě dluží. Typická je jádro-plášťová struktura z koncentrických lamelárních vrstev (turbostatická struktura)(viz obr. 9). Vytvářejí rozměrnější deskovité krystaly, které jsou téměř paralelní s osou vlákna, nejsou zvlněny. Ve struktuře jsou i mikroskopické póry. Pevnost se pohybuje od 1,3 do 3 GPa, tažnost je 0,2 – 1,3% a modul od 140 – 820 GPa. Při výrobě vláken z mezofázových smol se podařilo omezit vznik defektů během výroby[1,8,10].



Obr. 9 Uspořádání grafenových rovin ve struktuře vláken z mezofázových smol[1]

2.2.3.4 Uhlíkové nanotrubičky (CNT)

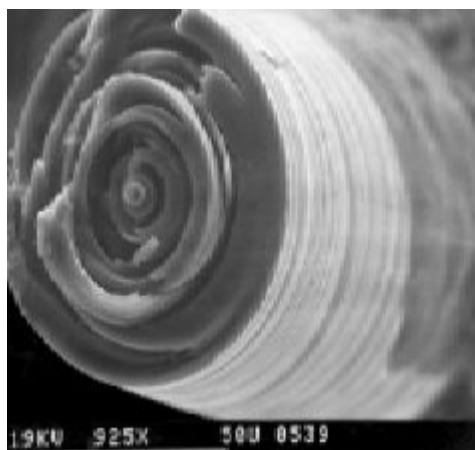
Uhlíkové nanotrubičky (CNT)(viz obr. 10) jsou bezešvé grafenové tabulární struktury o průměru několika nanometrů a s výrazně větší délkou. Jejich počáteční modul je v rozmezí 1 – 5 TPa (10x větší než u běžného uhlíku). Jejich pevnost je 100x vyšší než pevnost uhlíkových materiálů, tažnost je vyšší než 10%. V závislosti na průměru mohou být uhlíkové nanotrubičky buď polovodiči nebo vodiči. Elektrická vodivost těchto trubiček je kolem 6000 S/cm a tepelná vodivost je 2000 Wm⁻¹ K⁻¹. Základním problémem je využití těchto výjimečných vlastností v makrostrukturách. Převedení CNT do fibrilární formy a netkané textilie se provádí disperzací v polyetylenoxidu a elektrosvláknováním v elektrickém poli velikosti 0,75 KV/cm v roztoku ve vodě a chloroformu[8].



Obr. 10 Model nanotrubiček

2.2.3.5 Uhlíková nanovlákna

Uhlíková nanovlákna jsou vyráběna z uhlovodíkových par, organokovová směs je vstřikována do prostředí uhlovodíkových par o teplotě 1000 °C, malé částice sloučenin železa působí jako katalyzátor krátkých uhlíkových nanovláken, růst tloušťky je dosažen kondenzací par na podkladu, produkt je plynule odebírán z povrchu reaktoru. Průměr nanovláken se pohybuje 150 – 200 nm. Struktura těchto vláken je cibulovitá, protože aromatické roviny uhlíku jsou orientovány kolem osy vlákna (viz obr. 11)[8].



Obr. 11 Struktura uhlíkového nanovlákna[8]

2.2.3.6 Úprava uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se musí chránit hlavně před povrchovou oxidací, protože jsou křehčí než sklo. Dalším důvodem pro úpravu je odstranění látky bránící kontaktu s matricí a omezení absorpci plynů. Je také potřeba zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím.

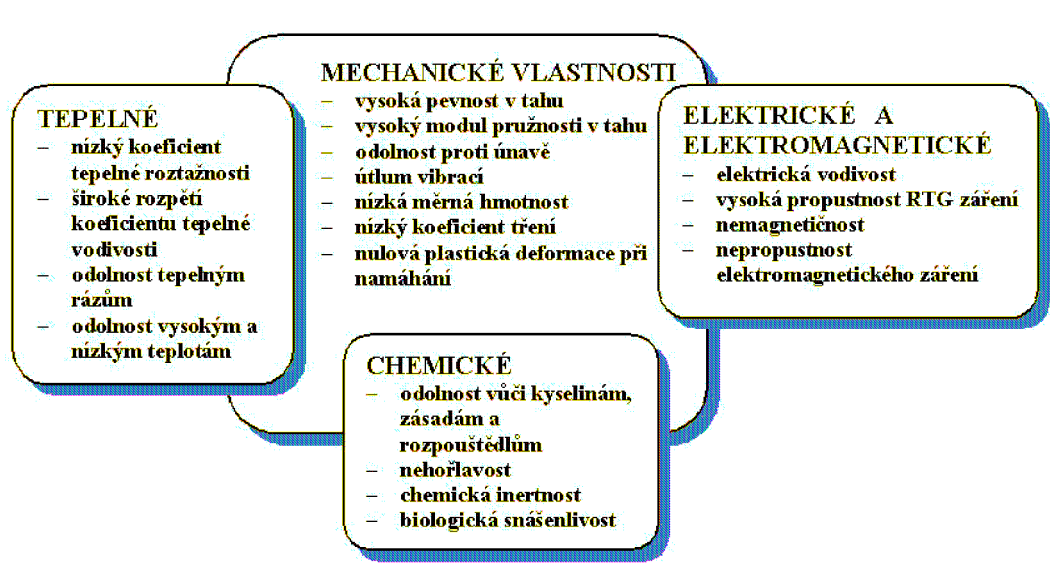
Úprava se provádí různými způsoby:

- mokrým způsobem – chemickým působením oxidačních látek (chromová kyselina) nebo anodickou oxidací vláken v elektrolytech (sulfid amonný)
- suchým způsobem – pomocí termické oxidace
- kontinuální úpravou - studeným vysokofrekvenčním plazmatem – při střídavém proudu okolo 15 MHz podle použitého plynného prostředí je možno dosahovat různých účinků – leptání a zdrsňování povrchu za použití kyslíku, očištění

vlákna a zlepšení snášivosti za použití argonu, implantace funkčních skupin na povrch při použití aminové skupiny (čpavku).

Při použití úpravy se občas pozoruje zlepšení tahové pevnosti, což je vysvětlováno zahojením povrchových defektů[1].

2.2.3.7 Vlastnosti uhlíkových vláken



Obr. 12 Souhrn vlastností užitečných uhlíkových vláken a kompozitů [11]

2.2.3.8 Použití uhlíkových vláken

Uhlíkové vlákno se nejvíce používá k vyztužení kompozitních materiálů, zvláště u materiálu známého jako uhlíkový laminát. Tento druh materiálu se používá při výrobě částí letadel, závodních vozidel (Formule 1), sportovního vybavení, jako jsou závodní kola, listy větrných generátorů a dalších součástí, jež jsou hodně mechanicky namáhány.

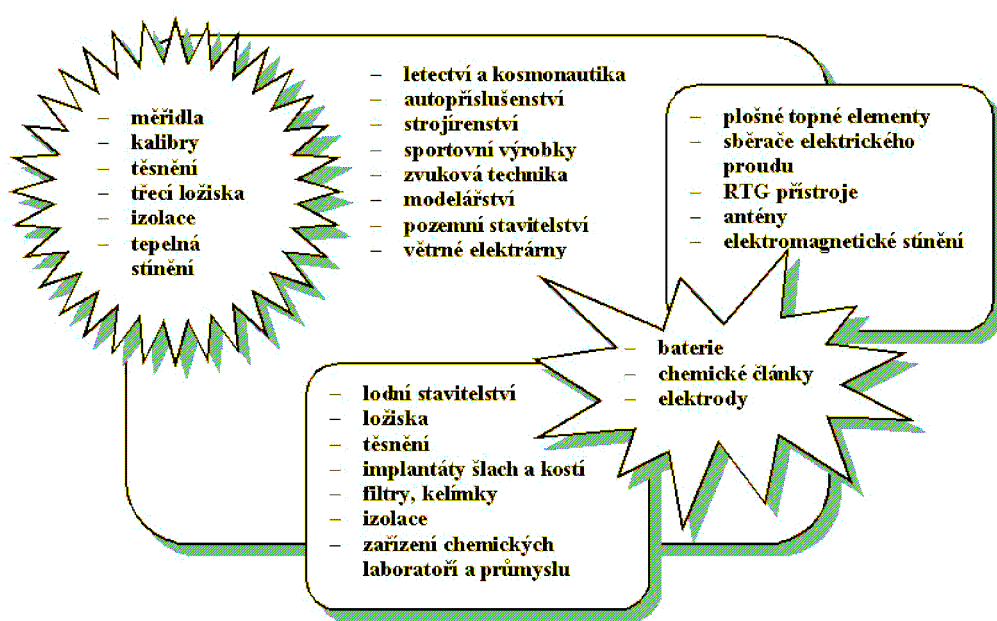
Také nepolymerické materiály mohou být použity jako matrice pro uhlíková vlákna. Kvůli vytváření kovových karbidů (např. ve vodě rozpustného karbidu hliníku), špatné smáčivosti s některými kovy a možnosti koroze, se však uhlíková vlákna v kovových maticích používají omezeně. Tyto problémy mohou být částečně odstraněny

povrchovou úpravou uhlíkových vláken, například napařením boridu titanu při výrobě uhlíko-hliníkového kompozitu.

Další z kompozitů uhlíku - uhlíkový laminát se používá jako ochrana nosové části a náběžných hran křídel amerických raketoplánů (viz obr. 13).

Uhlíková vlákna nacházejí též uplatnění u ozbrojených složek (výroba neprůstřelných vest), při výrobě hudebních nástrojů, membrán reproduktorů.

Uhlíkové vlákno se také používá v textilní výrobě[3,11].

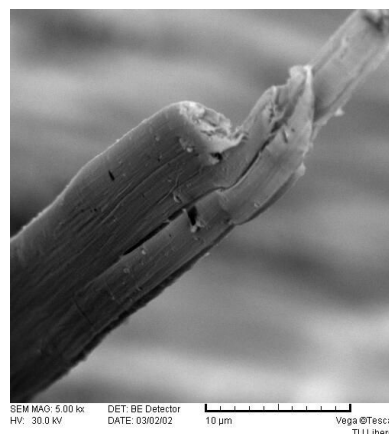


Obr. 13 Aplikace uhlíkových vláken a kompozitů[11]

2.2.4 Polymerní vlákna



Obr. 14 Kevlar[7]

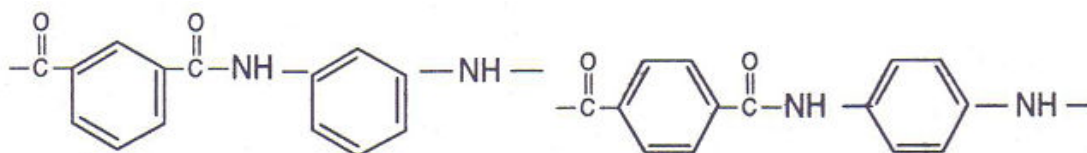


Obr. 15 Nomex[7]

Největší předností polymerních vláken je malá hustota a velká měrná pevnost. Tyto vlákna jsou lehká, ale velice pevná[1].

2.2.4.1 Aromatické polyamidy

První vlákno skupiny meta-aromatických polyamidů byl Nomex (viz obr. 15, 16) firmy DuPont (M-aramidy). Toto vlákno je zajímavé především pro svou termickou odolnost a elektrické izolační schopnosti. O pár let později firma DuPont začala s produkcí para-aromatických polyamidů pod názvem Kevlar (viz obr. 14, 17)(P-aramidy). Přednost tohoto vlákna je hlavně ve vysoké pevnosti a modulu[1,8,10].



Obr. 16 Struktura Nomexu[8]

Obr. 17 Struktura Kevlaru[8]

Vlivem přítomnosti benzenových jader, které brání pohyblivosti polymerních segmentů, jsou řetězce aramidů tuhé, což silně omezuje jejich rozpustnost a také způsobuje jejich netavitelnost. Dříve než se začnou tavit, tak se rozkládají. V roztoku zaujímají místo klubka tvar tyčinek. Při malých koncentracích polymeru v roztoku je uspořádání makromolekul izotropní, neboli náhodné. Při vícenasycených roztocích dochází k paralelizaci těchto tyčinek a vzniká uspořádanější struktura (viz obr. 18)[1,8,10].



Obr. 18 Struktura tyčinkových makromolekul v roztoku[8]

Zvláknování – 10–20% poly-para-phenyltereftalamid (PPD-T pro Kevlar), či poly-metha-phenylenizoftalamid (MPD-T pro Nomex) se rozpustí v kyselině sírové (H_2SO_4), neobsahující vodu, zahřáté na 80 °C. V roztoku je převážně nematická fáze. Volí se systém dry-jet-wet, kdy ve vzduchové mezeře mezi tryskou a koagulační lázní

probíhá průtah. Koagulační lázeň je ledová voda, ve které se kyselina vymyje a dochází k radiální orientaci krystalitů ve vlákne. Po neutralizaci a vysušení následuje zpracování za tepla při napětí, které nám zlepší orientaci řetězců a zvýší modul. Vlastnosti aramidových vláken lze měnit podmínkami dloužení a následného zpracování[1,8,10].

Vlastnosti

Kevlar - vysoká teplota měknutí (520 °C), elektricky nevodivé, nehořlavé, UV záření poškozuje vlákna, malá hustota ($\rho = 1440 \text{ kg/m}^3$), velká odolnost proti abrazi, neboli odolnost proti rázovému působení, vlákno je schopné se plasticky deformovat při působení síly kolmo na osu vlákna – odolnost vůči střelám a střepinám, používá se do neprůstřelných vest, kompozitů, a výrobků chránících proti prořezání. Krátká vlákna kevlaru se používají jako výztuž do termoplastů.

Nomex – levnější než Kevlar, nedosahuje mechanických vlastností jako Kevlar, má vyšší nehořlavost a odolnost proti vysokým teplotám, delší dobu nemění své vlastnosti při působení teplot přes 220 °C. Nomex má dobrou chemickou odolnost. Používá se do nehořlavých textilií, ochranných oděvů pro hasiče a voštin pro stavební materiály.

Dalšími aramidovými vlákny, které se používají v kompozitech, jsou vlákna Technora a Twaron japonské firmy Teijin, tato vlákna jsou vlastnostmi i strukturou podobná Kevlaru a Nomexu[1,8,10].

2.2.4.2 Vysoce pevná polyetylenová vlákna

Principem jejich výroby je zajištění maximálního přiblížení polymerních řetězců tak, aby z původně málo orientovaného systému s krystalinitou pod 60% (skládané řetězce) vznikl silně uspořádaný systém s krystalinitou kolem 85% (natažené řetězce). Pro zajištění pevnosti je třeba použít polyetylén s extrémně vysokou molekulovou hmotností– UHMW („ultra high molecular weight“). Jejich hustota je 970 kg m^{-3} .

Při gelovém zvláknování dochází k orientaci řetězců ve zvláknovacím roztoku. Po zvláknění vznikne polymerní gel, který lze dloužit na extrémně vysoké dloužící poměry. Ochlazením zvláknovacího roztoku dochází také ke vzniku gelu a částečnému

odstranění rozpouštědla. Poté se provádí dlužení v píce s teplotou 120 °C, při kterém se odstraní zbytky rozpouštědla.

Tato vlákna se vyrábí od názvem Dyneema, Spectra, Texmilon. Zmíněná vlákna mají podstatně vyšší odolnost vůči opakovanému ohybu a oděru, výbornou odolnost vůči působení chemikálií, světla a UV záření (při dlouhodobém působení dochází k poklesu). Radiační ozáření způsobuje porušení řetězců a tím i snížení pevnosti, vlákna však mají schopnost absorbovat extrémní množství deformační energie. Dále tato vlákna patří mezi elektrické izolátory. Při zvýšených teplotách se výrazně zhoršují mechanické vlastnosti. Pevnost má 7,5 GPa, tažnost 2,25 % a počáteční modul 335 GPa, ale zmíněná vlákna jsou silně nestejněměrná, nemají kruhový průřez a jejich variační koeficient pevnosti dosahuje okolo 20%.

Použití těchto vláken je omezeno vyššími teplotami. Teplota použití je od 80 – 100 °C. Používá se jak na měkkou ochranu - neprůstřelné vesty, tak i na tvrdou ochranu – neprůstřelné panely. Z těchto vláken se vyrábí extrémně lehké helmy, námořnická lana a používá se do kompozitů[1,8,10].

2.2.4.3 Aromatické polyestery

Jsou termoplasty na bázi aromatických polyesterů. Mají extrémně tuhé řetězce, které se spojují v tavenině do náhodně orientovaných domén. Není nutné připravovat roztok pro zvlákňování. Tavenina je protlačována tryskou, kde dochází k paralelizaci domén do směru toku. Po ochlazení vzniká vysoce orientovaná struktura s velkou pevností a modulem. Jelikož má vlákno vysokou orientaci řetězců, není nutné dlužení. Pro zvýšení pevnosti se provádí napřimování řetězců dopolykondenzací.

Tato vlákna se vyrábí pod názvem Vectran, Econol. Jejich vlastnosti jsou různé. Econol se používá spíše jako matrice, jeho pevnost je 3900MPa, modul pružnosti 138 GPa a prodloužení je 1,3 g/cm³. Vlákna Vectran jsou jedny z nejdražších vláken. Je to termotropní vlákno, které má vysokou teplotu tání, vysokou pevnost a vysoký modul, odolnost proti tečení, oděru a chemikáliím. Dále pak má nízký koeficient tepelné roztažnosti[1,8,10].

2.2.4.4 PBO vlákna

Vlákna na bázi poly-para-fenylen-benzolbisoaxasolu, která mají vysoce uspořádanou strukturu, vysoce tuhé řebříčkovité makromolekuly. Vynikají svými mechanickými vlastnostmi, tepelnou odolností, jsou poměrně flexibilní. Jejich modul patří k nejvyšším z kategorie vysoce pevných vláken. Zvlákněje se z roztoků v kyselině polyfosforečné způsobem dry-jet-wet, poté se tepelně zpracovává při teplotě 500 – 600 °C pod napětím v dusíkové atmosféře. Pro svoje vysoké LOI = 68 (jedna z nejvyšších hodnot) se začala vyrábět do nehořlavých obleků. Dále se používají do barrier proti ohni a rázům a v kompozitech. Jsou náhradou za asbest[1,8,10].

2.2.4.5 PBI vlákna

Vlákna na bázi polybenzimidazolu. Mají menší pevnost než PBO vlákna, velké prodloužení při přetržení, výbornou odolnost proti chemikáliím, odolnost vůči UV záření. Původně byla PBI vlákna používána pro vojenské účely a jako nehořlavý materiál pro atmosféru bohatou na kyslík – pro oděvy kosmonautů, pilotů. Používají se také jako prepolymery pro uhlíková vlákna a náhrada azbestu. Nyní se však používají především do speciálních ochranných oděvů[1,8,10].

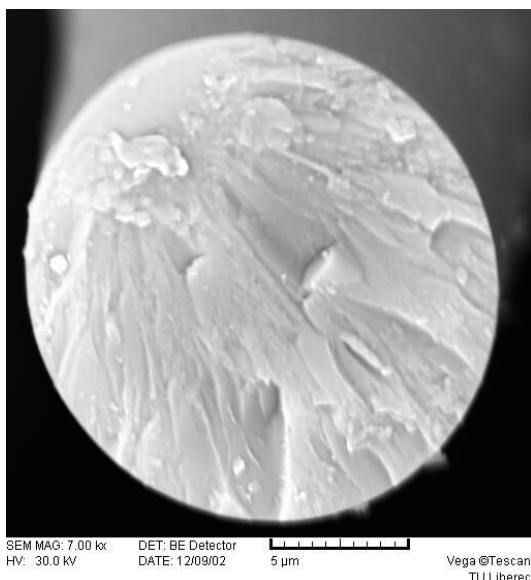
2.2.5 Borová vlákna

První z vláken, která při pevnosti v tahu 3,45 GPa a hustotě 2,5 g/cm³ dosahovala modulu pružnosti 400 GPa. Jsou však poměrně drahá. Jejich průměr je však proti ostatním vláknům větší, ale jejich tvarová stabilita při tlakovém namáhání je také větší. Pevnost v tlaku je větší, než pevnost v tahu. Tato vlákna se připravují kondenzací plynného prekurzoru bóru na vláknovém substrátu. Dříve se jako vláknový substrát používalo wolframové vlákno, dnes se už užívají i levnější a lehčí varianty, a to například uhlíkové vlákno připravené z izotropních smol. Po tepelném zpracování má vlákno jemnou krystalickou strukturu, což dává vláknu dobrou adhezi k pryskyřicím. Neupravená bórová vlákna reagují s kovem, proto nejsou vhodná do kovových matic. Na povrch vláken lze nanést tenkou vrstvu SiC.

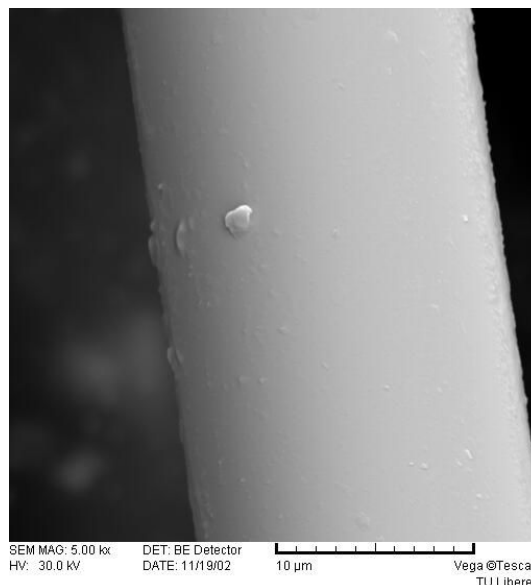
Bórová vlákna se používají hlavně ke zpevnění konců tlakem namáhaných konců prvků, dílů s velmi malou tepelnou roztažností a roztažností způsobené

absorbovanou vlhkostí a dále pro tlakem namáhané vzpěry amerických raketoplánů[1,10].

2.2.6 Čedičová vlákna



Obr. 19 Lom čedičového vlákna



Obr. 20 Podélný pohled čedičového vlákna

Čedičové horniny vhodné pro výrobu vláken obsahují dva typy základních minerálů, a to olivín a nefelin. Podle obsahu SiO_2 se čediče dělí do tří skupin:

1. alkalické čediče
2. slabě kyselé čediče
3. kyselé čediče

Pro výrobu vláken se používají kyselé čediče. Vyrábějí se tavným zvlákňováním při 1 500 – 1 700 °C. Vlákná mohou být dloužena při teplotách kolem 1 300 °C. Z příčného lomu vláken je vidět křehký lom, který je způsobený heterogenitami struktury. Při dostatečně rychlém ochlazení dochází ke vzniku sklovité, přibližně amorfni struktury (viz obr. 19, 20).

Čedič je stabilnější v silně alkalickém prostředí než skla, ale stabilita v kyselém prostředí je menší. Tato vlákna mohou být použita do nízkých teplot i do vysokých teplot, mají široký rozsah teplotního použití (-200 °C – 800 °C). Pevnost čedičových vláken se pohybuje kolem 1,1 – 1,5 GPa, smykový modul kolem 21,76 GPa a tažnost kolem 2%.

Používají se pro letecké aplikace jako náhrada S-skla. Dále se používají místo azbestu a slouží jako izolanty, jak tepelné tak i zvukové. Mají dobré elektrické vlastnosti. Používají se pro vyztužené plasty v automobilech a pro betonové výztuže[1,10].

2.2.7 Keramická vlákna

Keramická vlákna mají buď amorfni strukturu (sklo na bázi křemíku) nebo jsou krystalická. Typická vysoká pevnost a křehkost je dána právě krystalickou mřížkou, která má odolnost vůči dislokačnímu pohybu. Suroviny pro výrobu uvedených vláken jsou:

- kysličníky
- směsi kysličníků
- karbidy
- nitridy
- prvky jako je bór a uhlík

Keramická vlákna se vyrábí různými způsoby:

- zvlákňováním z keramiky: jelikož je nutné použít vysoké teploty, používá se minimálně
- chemickou nebo tepelnou konverzí prekursorů: používá se rozklad anorganických polymerů
- sol/gel metodou: modifikace tepelného rozkladu, z disperse (solu) se těkáním rozpouštědla připraví gel, který se za tepla zvlákňuje a rozkládá
- zvlákňováním z disperse: zvlákňuje se disperse částic keramiky v polymerní kapalině
- chemickým ukládáním par: pro malá vlákna, na vhodný nosič se ukládá z plynné fáze, který vyvolanou chemickou reakcí převede vlákno na keramiku
- růstem monokrystalů: vytváří se pomocí elektrického výboje, buď z taveniny nebo plynné fáze na vhodném zárodku.

Vyhovující vlastnosti keramických vláken jsou jejich vysoká pevnost a počáteční modul, relativně nízká měrná hmotnost v porovnání s kovy, výborná tepelná vodivost a malá tepelná roztažnost. Dále mají výjimečnou odolnost vůči chemikáliím.

SiC kontinuální vlákna se používají pro letecký průmysl a pro výrobky pracující za vysokých teplot. Whiskery SiC vyztužují kovové matrice – písty spalovacích motorů pro závodní stroje.

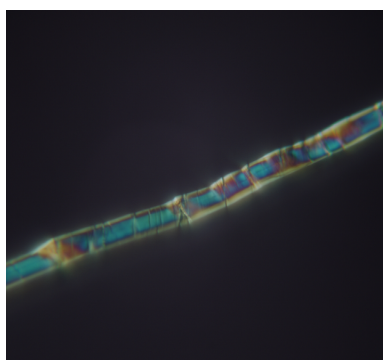
Al₂O₃ kontinuální vlákna mají stejné použití jako předchozí vlákna, ale tato vlákna jsou elektricky nevodivá. Používají se jako výztuž kovových matric a do součástí, které musí odolávat abrazi a musí být vysoce tvrdé.

Si₃N₄ kontinuální vlákna jsou elektricky nevodivá a odolná proti opotřebení[1,10].

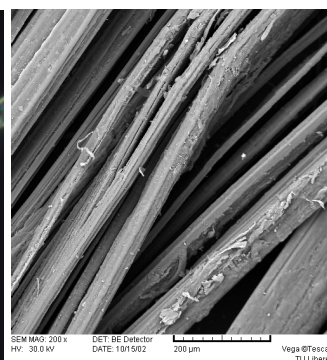
2.2.8 Přírodní vlákna z rostlin



Obr. 21 Bavlna



Obr. 22 Len



Obr. 23 Juta

Často se používají organická přírodní vlákna, jako např. konopí, juta, len, bavlna (viz obr. 21, 22, 23), a nebo dřevěné piliny (vlákna obsahující celulózu). Nacházejí uplatnění ve výztužích tvarovaných velkoplošných dílů pro interiéry osobních automobilů. Mísí se ve většině případu s polypropylénovou matricí (nutno nepolární matrici modifikovat polární složkou pro lepší soudržnost). Výhody využití přírodních vláken v termoplastech jsou následující:

- laciná výztuž, recyklovatelnost, biodegradabilita, povrch výrobku má přírodní vzhled, rychlejší výrobní cyklus, úspora polymeru, vlákna nezpůsobují opotřebení zpracovatelských strojů[1]

2.2.9 Přírodní minerální vlákna

Azbestová vlákna – jsou krystalické přírodní keramické materiály, minerály, které krystalizují ve vláknité formě. Představitelem azbestů je Chrysotil. Mají výbornou odolnost vůči vysokým teplotám, chemikáliím a mikroorganismům. Jejich nevýhodou je oddělování tenkých a tuhých vlákenek, které se vznášejí vzduchem a při vdechnutí se zabodávají do plic, kde vyvolávají řadu onemocnění (azbest je karcinogenní). V Británii mají stanovenou normu pro obsah vláken ve vzduchu (2 vlákna na 1ml vzduchu)[1,10].

2.2.10 Proteinová vlákna

Jde o vlákna pavouků, ze kterých si vyrábí pavučinu. Je to materiál s nejvyšší měrnou pevností a vysokým poměrným prodloužením. Jelikož se pavouci nedají hromadně pěstovat jako například bourec morušový, neboť jsou agresivní a chrání své teritorium, proto se gen pavouků transplantoval do mléčných žláz koz. Z mléka se poté dají extrakcí a rafinací spřádat vlákna. Tato vlákna jsou biodegradabilní, a proto jsou vhodná pro chirurgické použití. Dále se s použitím těchto vláken vyvíjejí neprůstřelné vesty[1,10].

2.2.11 Kovová vlákna

Surovinami na výrobu kovových vláken jsou ocel, měď, bronz a hliník. Způsoby výroby kovových vláken jsou dva. První způsob jsou nekonečně jemné třísky kovových vláken, které jsou vyráběné obráběním, při kterém vzniká více vláken, která se navíjejí na vlákna a pak se melou, vlákna mají obdélníkový průřez. Druhý způsob jsou metaloplastické řezané nitě, které jsou laminované nebo pokovované. Tyto folie se poté rozřezávají na tloušťku vláken.

Kovová vlákna se používají v textilní výrobě, jako vzorovací prvky nebo do koberec pro snížení elektrostatického náboje. V technickém využití mají tato vlákna velké přednosti, jako jsou mechanické, chemické a elektrické vlastnosti. Vzhledem ke

své dobré zpracovatelnosti se mohou upravovat stříháním, letováním, navíjením, lisováním atd..

Využívají se v technické sféře například do zvukových tlumičů, jako brzdové a kluzné obložení, mechanické a magnetické plnivo ve filtrech, čistící a brusné médium a jako tepelné izolace a elastické podklady[1,10].

2.3 Matrice

2.3.1 Rozdělení

Nejpoužívanější matrice pro vláknové kompozity jsou polymerní matrice, které se dělí do dvou skupin:

1) Reaktoplastické matrice (termosety)

- nenasycené polyesterové matrice
- vinylesterové matrice
- epoxidové pryskyřice
- fenolické pryskyřice

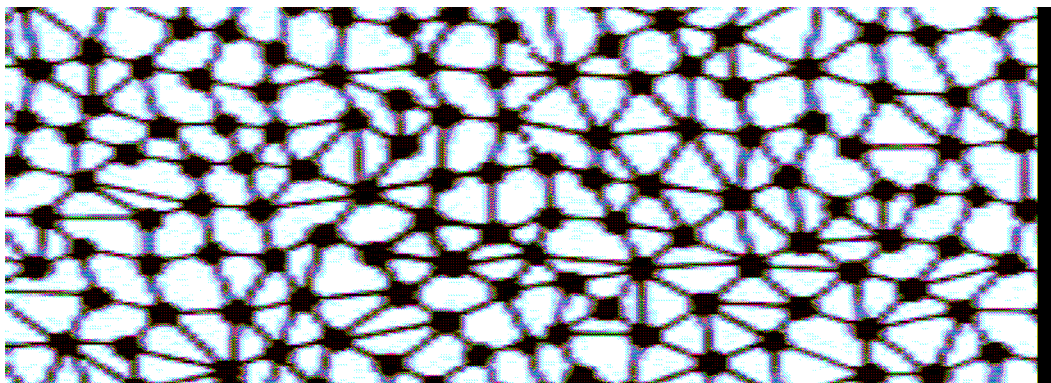
2) Termoplastické matrice

- polypropylen
- polyamid
- polyamidy

Výběr matrice z hlediska užitných a zpracovatelských vlastností kompozitů:

- nároky na cenu (reaktoplasty jsou levnější), nehořlavost, chemická odolnost (reaktoplasty pro běžné aplikace), skladovatelnost materiálů (u termoplastických pojiv neomezená), recyklovatelnost materiálu (reaktoplasty - jen u drahých vláken, termoplasty - matici lze znovu roztavit), smáčivost vystužujících vláken (reaktoplasty - snazší smáčení, termoplasty-problém se smáčením)[1].

2.3.2 Reaktoplasty



Obr. 24 Chemická struktura reaktoplastů[1]

Reaktoplasty jsou zesíťované polymery, které vytvářejí prostorovou trojrozměrnou síť (viz obr. 24). Zesíťování nastává až při tváření plastu vlivem tepla a tlaku, někdy působením katalyzátorů. Jakmile je zesíťování dokončeno, není další tváření možné, protože opětovným dodáváním tepelné energie není možno hmotu roztavit. Husté příčné zesíťování se nazývá vytvrzování[1].

2.3.2.1 Nenasycené polyesterové matrice (UP)

Nenasycené polyesterové matrice patří k nejpoužívanějším pryskyřicím, základní druhy jsou:

- orthoftalová: nejnižší cena, omezená chemická a tepelná odolnost
- izoftalová: dražší, kvalitnější, lepší odolnosti
- fumarová: dobrá chemická a tepelná odolnost
- chlorftalová: nehořlavá, mechanické vlastnosti horší
- tereftalová: velmi dobrá chemická odolnost

Výroba probíhá následovně – příprava prepolymeru reakcí dvou funkčních složek, poté je vzniklý prepolymer rozpuštěn v reaktivním rozpouštědle, za pomoci katalyzátoru nastává síťovací reakce s přidáním urychlovače. Viskozita pryskyřice záleží na použitém rozpouštědle. Tyto pryskyřice jsou vhodné pro všechny typy technologií přípravy vláknenných kompozitů. Nemodifikované nenasyčené polyesterové pryskyřice jsou křehké, mají dobrou elektrickou vodivost, odolnost proti ultrafialovému

záření, dobře smáčí skleněná vlákna. Směsi pryskyřic s plnivý a práškovými termoplasty mají menší smrštění, a proto i lepší povrch kompozitu[1].

2.3.2.2 Vinylesterové pryskyřice (VE)

Vinylesterové pryskyřice (VE) jsou dražší než nenasycené polyesterové matrice (UP), tyto pryskyřice mají menší stupeň zesítní, větší ohebnost, větší odolnost proti tvorbě mikrotrhlinek, lepší odolnost, proti korozi, vyšší teplotu skelného přechodu, pomalejší reakci při vytvrzování. Kompozity mají vyšší mezilamelární smykovou pevnost, větší houževnatost[1].

2.3.2.3 Epoxidové pryskyřice (EP)

Epoxidové pryskyřice (EP) jsou nejvšestrannější reaktoplasty pro konstrukční kompozity, mají nejširší rozsah vlastností použití. Dobrou houževnatost, odolnost, proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům, dobrou teplotní odolnost, výbornou chemickou odolnost, výborné elektrické vlastnosti, malé smrštění při vytvrzování. Všechny vlastnosti můžeme měnit, podle použité chemické struktury pryskyřice, použitého tvrdidla, modifikujících složek. Vytvrzovací proces probíhá pomalu, stupňovitě, pomocí urychlovačů lze proces zkrátit, pokud není použit vysoký tlak, vznikne kompozit bez dutin. Při vhodné volbě systému pryskyřice se musí přihlídnout ke způsobu výroby kompozitu, mechanickým vlastnostem pryskyřice, teplotní odolnosti, a chemickým a fyzikálním vlastnostem. Epoxidové pryskyřice je možné použít pro všechny typy technologií výroby kompozitů[1].

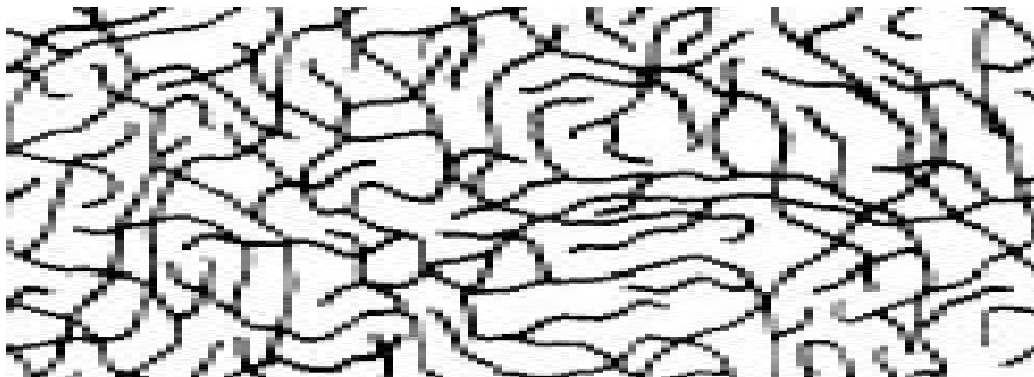
2.3.2.4 Fenolické pryskyřice (PF)

Fenolické pryskyřice (PF) můžeme rozdělit na dva základní typy:

- reaktoplasty pro lisování (nejlevnější)
- novolakové pro lamináty (ohebné, více reaktivní a kompaktní)

Čisté fenolické pryskyřice jsou za normální teploty tuhé, neohebné, křehké, odolné i za zvýšených teplot, mohou přenášet zatížení při teplotách vyšších než T_g . Nehořlavé, nevyvíjí kouř. Novolakové pryskyřice obsahují kyselé katalyzátory, vytvrzují se pomocí aminů, pokud nechceme bubliny v kompozitu, musíme pryskyřici vytvrzovat za vyšších teplot a vyšším tlaku. Rosolové pryskyřice jsou tekuté ve formě alkoholického roztoku, či vodné suspenze. Mají větší flexibilitu, jsou vhodné pro přípravu prepregů a mohou být vytvrzeny pomocí katalyzátorů. Hlavní použití fenolických pryskyřic bylo dříve jen v leteckém průmyslu, nyní i v konstrukci železničních vagónů pro interiéry vagónů, konstrukci sedaček. V zahraničí i pro konstrukce schodišť metra[1].

2.3.3 Termoplasty



Obr. 25 Struktura termoplastů[1]

Termoplasty (viz obr. 25) jsou plastický, deformovatelný materiál, který si tyto vlastnosti uchovává i po zahřátí a opětovném ochlazení. Většinu termoplastů tvoří vysokomolekulární polymery, jejichž řetězce mezi sebou interagují slabými van der Waalsovými silami (polyethylen), silnějšími dipól-dipólovými interakcemi a vodíkovými vazbami (nylon) nebo π - π interakcemi mezi aromatickými kruhy (polystyren).

Výhody těchto matric jsou především v neomezené skladovací době, výborné chemické odolnosti, neabsorbovatelnosti vlhkosti, ve velmi dobré houževnatosti oproti nemodifikovaným reaktoplastům. Pro tento druh matric se prepregy zpracovávají za tepla, proto umožňují výrobu tvarovaných dílů, spojování vrstev prepregů natavováním. Tuhnutí matrice závisí na rychlosti odvodu tepla. Teplotní odolností předčí i reaktoplasty. Jsou nehořlavé, ale mají vyšší cenu. Používají se převážně v automobilovém průmyslu. Příklady špičkových aromatických termoplastů:

- polyfenylénsulfidy
- polyetherimidy
- polyamidoimidy
- polyetherketony
- termoplastické polyamidy[1]

2.3.4 Geopolymerní matrice

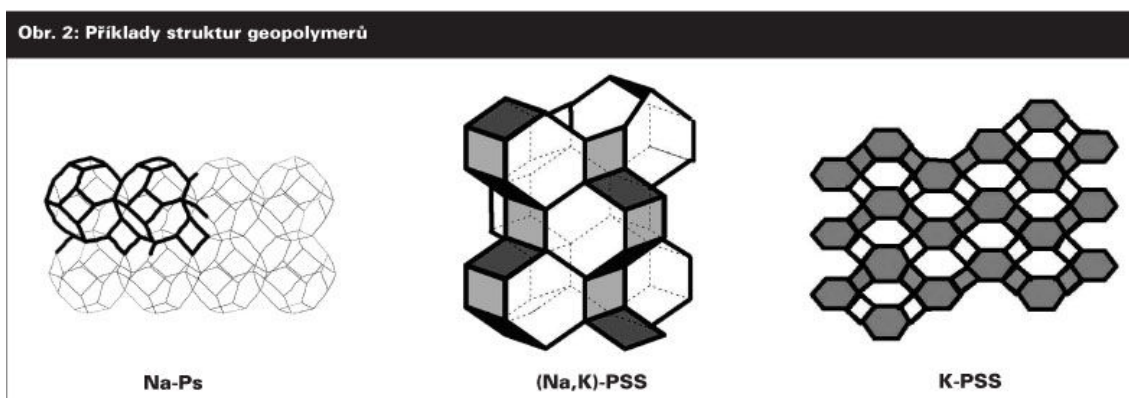
V roce 1974 francouzský profesor chemie Joseph Davidovits přišel s objevem, že každý kámen se dá vytvořit uměle. Novou hmotu nazval geopolymery. Současně ho zaujala záhada egyptských pyramid natolik, aby se pokusil dokázat, že již před více než 4500 lety znalo lidstvo dosud nejdokonalejší stavební materiál na planetě Zemi. Nakonec dospěl k závěru, že Egypťané využili období záplav, svezli písek z nejbližšího okolí, napěchovali ho do forem (předem připravené dřevěné šalování), smísili s aktivními prostředky (vápenec, voda, jíl, soli) - a slunce změnilo směs v litý kámen. U egyptologů tehdy vyvolal doslova pobouření. Dnes vše nasvědčuje tomu, že měl pravdu.

Při zkoumání kamenů z pyramid byly také uvnitř hmoty nalezeny vlasy. Když Davidovits pořídil průřez kvádrem z pyramidy, zjistil, že je ve spodní části hustší než v horní. Profesor tak rozbil názor o využití jakýchsi ramp postavených v ostrém úhlu ke zvedání kamenných bloků. Nehledě na to, že jeho teorii podporují i dochovaná vyobrazení a hieroglyfický zápis na čtyřech staroegyptských tabulkách.

Pod pojmem geopolymery se skrývají anorganické uměle vyrobené (polymerní) materiály, připravované reakcí základních hlinito-křemičitanových minerálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku (viz obr. 26). Tato reakce se označuje jako geopolymery. Její pomocí lze využít řadu odpadních surovin a přeměnit je na plnohodnotné geopolymerní materiály.

Geopolymery jsou na první pohled nerozeznatelné od kamene, svými atributy jej však převyšují. Nabízejí velké množství modifikací a dosažení jedinečných kombinací vlastností, díky nimž materiál přečká tisíciletí. Patří k nim především vysoká pevnost v tlaku a odolnost vůči kyselým dešťům, ohni i bakteriím, respektive, vzhledem k plně anorganické skladbě geopolymérů, vůči vysokým teplotám (do 1000 °C), při kterých již nelze použít cement. Také přívlastek „materiál šetřící životní prostředí“ je na místě, při jejich přípravě se totiž vznik emisí CO₂ snižuje o více než 50 %.

Geopolymery nabízejí různorodé uplatnění. Pro svou extrémní odolnost mohou sloužit především jako vynikající izolace a stavební materiál. První aplikace ve stavebnictví pocházejí z let 1972-1976, kdy byl geopolymér nanášen na dřevotřískové desky, aby zvýšil jejich ohnivzdornost. Geopolymerní cement Parament byl zase použit pro opravu letištní plochy v Los Angeles. V brzké době lze očekávat využití geopolymérů při výstavbě silnic, protihlukových stěn, mostů, budov a jiných původně betonových staveb. Do budoucna pak může být velmi podstatná stabilizace nebezpečných a radioaktivních odpadů pomocí geopolymerních matric (tzv. solidifikace).



Obr. 26 Struktury geopolymérů[14]

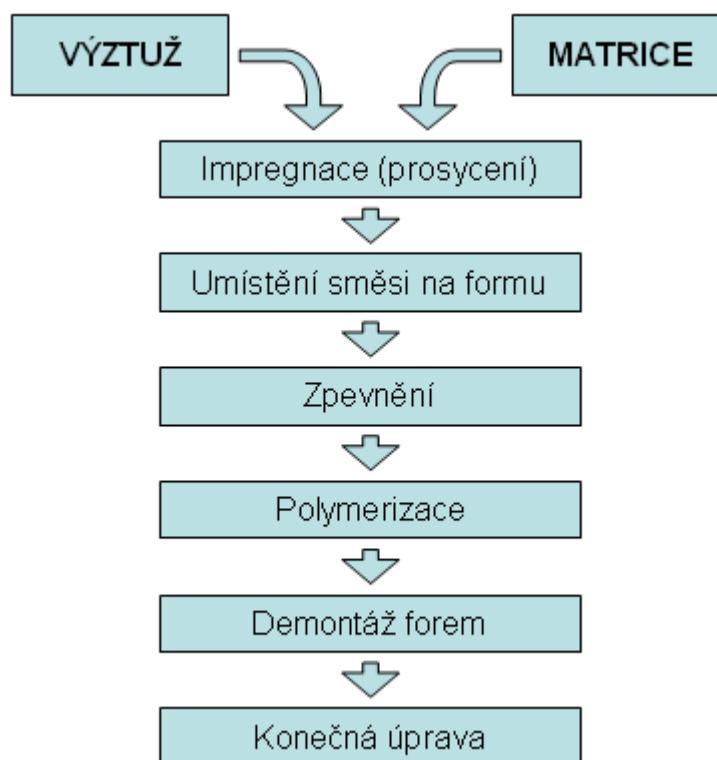
2.4 Výroba kompozitů

Pro výrobu kompozitů jsou důležité formy na tvarování výsledných profilů, dílů. Používané formy pro výrobu tvarovaných kompozitů se dají dělit dle typu:

- otevřené jednodílné formy
- uzavřené dvoudílné formy

Typ formy se volí dle způsobu odpařování reaktivního rozpouštědla.

Dělení kompozitů dle výroby je náročné a nepraktické, neboť existuje mnoho způsobů, jak vyrábět tyto materiály. Na následujícím obrázku č. 27 je schéma základní výroby kompozitů, které je použito i pro výrobu vzorků pro měření v této diplomové práci[1].

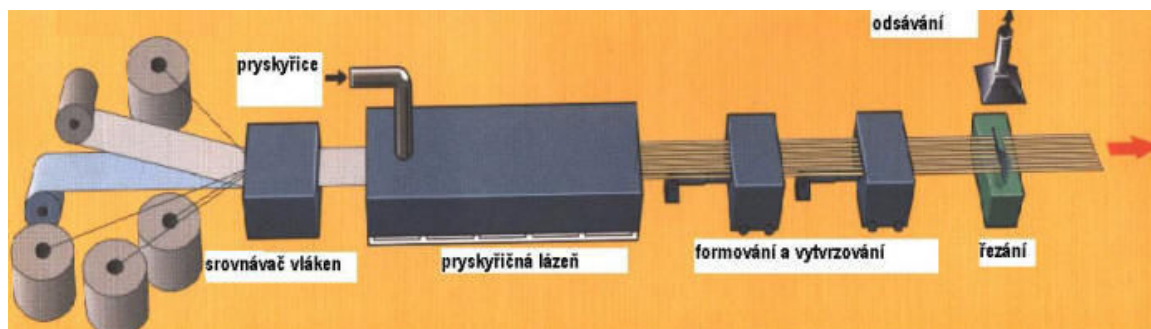


Obr. 27 Schéma výroby kompozitních dílů[15]

Při tomto způsobu výroby se nejčastěji kompozity vytvrzují za studena při pokojové teplotě. Teplota však nesmí klesnout pod 15 °C z důvodu zastavení průběhu polymerizace. Polymerizace je chemická reakce, při které z malých molekul vznikají vysokomolekulární látky a z monomerů vznikají polymery.

Dalším nejčastěji používaným způsobem výroby je pultruze. Je to kontinuální výrobní proces kompozitních profilů, jež mají konstantní příčný řez a jsou využívány

pro specifické účely. Metoda zajišťuje opakovaně konstantní kvalitu. Pultruze (viz obr. 28) je založena na tažení vyztužujícího materiálu (vláken) skrz impregnační vanu, kde se vlákna prosycují matricí a následně se vedou do formy, kde dojde ke konečnému zformování nebo vstřikováním, kde se vlákna navedou do formy a do této formy je následně vstřikována matrice. Ve formě je kompozit prohříván a vytvrzován. Tento způsob je lepší než protahování výztuže matricí a následné řezání na požadovaný rozměr[4].



Obr. 28 Schéma pultruzní linky

Dalším způsobem výroby kompozitních dílů je ruční kladení prepregů. Tento způsob se používá pro prepregy s reaktoplastickou matricí. Výroba je kusová a mechanicky namáhavá. Používá se otevřená forma opatřená neporézní fólií. Na tuto folii se kladou nařezané prepregy, pro lepší lepivost jsou prepregy ohřívány. Vrchní vrstva kompozitu umožňuje průnik přebytečné pryskyřice do odsávací vrstvy, která je odolná vůči teplotě vytvrzování. Neprodyšná folie překrývá odsávací vrstvu. Takto navrstvený kompozit je dán do autoklávu (viz obr. 29). Je to tlaková komora, která odsává vzduch a tímto se vrstvy na sebe přitlačují atmosférickým tlakem. Ohřívá se na požadovanou teplotu vytvrzování pryskyřice při přetlaku, který ještě více přitlačí vrstvy na sebe. Tím je zaručen minimální obsah pryskyřice v kompozitním dílu. Doba působení teploty a přetlaku je dána podle doby vytvrzování pryskyřice. Chladnutí musí být dostatečně pomalé kvůli relaxaci vnitřního pnutí.

Kladení může být i strojově pomocí kladecích přístrojů řízené počítačem[1].



Obr. 29 Autokláv[1]

Další druhy výroby kompozitů:

- Šroubovicové navíjení: výroba rotačních i nerotačních nádob, trubek, tanků
- Pólové navíjení: pro raketové motory
- VARTM (vacuum assisted resin transfer moulding): beztlakové prosycování v uzavřené formě s případným použitím vakua
- SCRIMP (seemann composite resin infusion moulding process): pro výrobu velkoplošných výrobků
- VBM (vacuum bag moulding): jedna plocha kompozitu hladká, druhá plocha kryta teplotně odolným vakem, pro menší díly
- IM (injection moulding): vstřikování směsi polymeru a krátkých vláken
- RRIM (reinforced reaction injection moulding): vstřikování směsi pryskyřice a krátkých vláken do kovové formy
- SRIM (structural reaction injection moulding): vstřikování pryskyřice do formy s předem vloženou výztuží
- BMC (bulk moulding compound): směs pryskyřice a krátkých vláken používaná pro lisování
- SMC (sheet moulding compound): vláčný polotuhý plát z polotuhé směsi matrice, vláken, ztužujících přísad, plniv a dalších aditiv pro lisování za tepla

- DMC (dough moulding compound): lisování reaktoplastů a krátkých vláken
- TMC (thick moulding compound): obdoba SMC s větší tloušťkou polotovaru
- LPMC (low pressure moulding compound): směs pro nízkotlaké lisování, polotuhá konzistence získaná pomocí krystalizující přísady
- GMT (glass mat thermoplastic): tváření termoplastických desek obsahující rohož, polotovary mohou být ze skleněných, uhlíkových a aramidových vláken
- Stříkání: pomocí stříkací pistole rozprašována směs katalyzované pryskyřice a krátkých vláken
- Kontinuální laminování: výroba profilů pro stavebnictví, elektroniku, na vrstvu pryskyřice sypaná sekaná skleněná vlákna
- Rotační odlévání: výroba potrubí pro rozvod tlakové vody, směs katalyzované pryskyřice a sekaných skleněných pramenů a písek[1]

3. Experimentální část

3.1 Charakteristika použitých materiálů

3.1.1 Uhlíková vlákna firmy Kureha

Vlákna používaná v této práci dodala firma Kureha, která se zabývá výrobou uhlíkových a grafitových vláken a dalších produktů z této suroviny. Tato vlákna jsou vyráběna na bázi černouhelného dehtu. Vlákna jsou karbonizovaná při teplotě 1000 °C. Grafitová vlákna jsou pak následně ještě dále tepelně zpevňována při teplotě 2000 °C. Grafitizací dostává vlákno větší tuhost, ale za cenu ztráty pevnosti[16].

Specifikace uhlíkových vláken:

Tab. 1 Specifikace použitých uhlíkových vláken od firmy Kureha[16]

Vlastnost	Jednotka	Výsledná hodnota
Průměrný průměr vlákna	μm	16,4
Síla	MPa	799
Prodloužení	%	2,2
Specifická váha		1,63
Průměrná délka	mm	10,5

Tato vlákna jsou vyráběna z koudelky sekáním nebo drcením (viz obr. 30). Jsou charakterizovaná velkou pevností, dobrou odolností proti opotřebení, dobrou tepelnou odolností a odolávají korozi (viz tab. 1). Jsou hodně používána do směsí s betonem, plastem a pryží. Používají se také jako náhražka azbestu v brzdových destičkách, obložení a těsnění, také jako tepelné izolátory ve vysokých teplotách, například v průmyslových pecích.

Další druhy výrobků, které firma Kureha vyrábí:

- prameny, příze
- tkanina
- plst'
- pevná tepelná izolace

- kompozit uhlík/uhlík - papír
- kompozit uhlík/uhlík – šrouby
- papír ze sekaných vláken
- rohože z dlouhých sekaných vláken
- uhlíkové desky[16]



Obr. 30 Uhlíkové vlákna firmy Kureha

3.1.2 Geopolymerní matrice

Geopolymer je uměle vytvořený kámen. Je to anorganický polymer na bázi metakaolinitu. Je připravován polymerační reakcí základních hlinito-křemičitanových materiálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Polymerace je chemická reakce, při níž se molekuly jednoduché organické sloučeniny slučují a tvoří makromolekulární látky bez vzniku vedlejšího produktu. Dochází ke spojování molekul obsahujících alespoň jednu dvojnou nebo trojnou vazbu. K tomu aby reakce proběhla, se používají látky zvané iniciátory[14,17].

Geopolymer použitý pro vzorky je vyroben ze dvou složek:

- a) pevná fáze – křemičitan hlinitý – metakaolin
- b) kapalná fáze – vodní sklo

Použitý metakaolin z Českých lupkových závodů je typu pucolánů vyrobený výpalem kaolinů, kaolinitických jílů a jiných vhodných surovin v teplotním rozmezí cca 600 - 900 °C. Pucolány jsou křemičité nebo hlinitokřemičité materiály, které získávají pojivové vlastnosti reakcí s Ca(OH)_2 za přítomnosti vlhkosti. Kvalita je přímo úměrná výši kaolinitu v surovině[18].

Použité vodní sklo (viz tab. 2) firmy SETUZA, a.s. je koloidní roztok křemičitanu sodného ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$). Je to zakalená viskózní kapalina alkalického charakteru, jejíž barva je ovlivněna složením výchozí suroviny a může být naředlá, nazelenalá, namodralá, nažloutlá a načervenalá[19].

Tab. 2 Parametry použitého vodního skla[19]

Druh	Hustota při 20°C v kg/m³	Molární poměr SiO₂/Na₂O
50-52	1525-1557	2,3 - 2,5

Poměr použitých složek:

- matrice: 140 g vodního skla – 53% v matrici
80 g metakaolinitu – 30% v matrici
44 ml H₂O – 17% v matrici
- výztuž: 2% (5,28g), 4% (10,56g) nebo 6% (15,84) uhlíkových vláken přidáno do matrice

3.1.3 Postup výroby

Vodní sklo a metakaolin byly promíchány, následně se přidala voda. Do takto připravené matrice bylo přimícháno definované procento uhlíkových vláken (viz obr. 31). Ze vzniklého kompozitu byl odlit monoblok za pomoci vibrací 20 000 kmitů/min. Druhý den po zatvrdnutí byly řezány vzorky požadovaného rozměru na okružní diamantové vodou chlazené pile.

Nařezané vzorky byly zabaleny do folie z důvodu zrání vzorku. Pokud by vzorky nebyly zabaleny ve folii a voda by se rychle vypařovala, nastalo by popraskání matrice. Proces dozrávání vzorků musí probíhat při teplotách nad 15 °C, při nižších teplotách se proces zrání zastaví a znovu už se nerozeběhne (viz obr. 32).



Obr. 31 Míchací zařízení vlastní výroby



Obr. 32 Popraskaný vzorek, který nebyl zabalený ve folii, položený na vzorku, který byl zabalený ve folii

3.1.4 Rozměry použitých vzorků

Pro měření akustické pohltivosti byly vyrobeny kruhové vzorky o průměru 29 mm a tloušťce 10 mm.

Pro měření elektrické vodivosti byly vyrobeny čtvercové vzorky o rozměru 150 x 150 mm a tloušťce 10 mm.

Pro měření mechanických vlastností byly vyrobeny obdélníkové vzorky o rozměru 50 x 150 mm a tloušťkou 10 mm.

Pro měření tepelné vodivosti byly vyrobeny čtvercové vzorky o rozměru 50 x 50 mm a tloušťkou 10 mm.

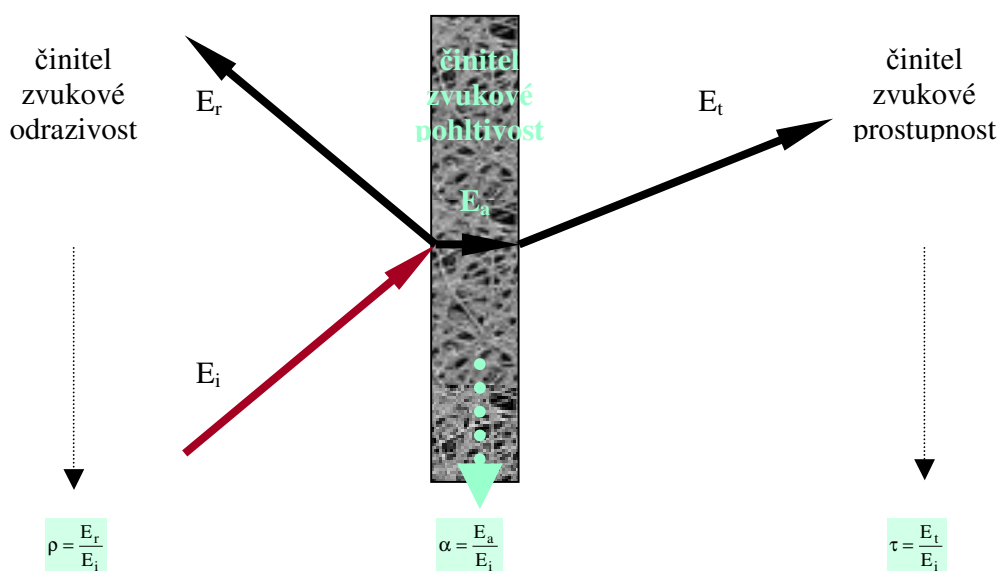
3.2 Experimenty

3.2.1 Akustická pohltivost

Akustickou pohltivostí se rozumí schopnost materiálu pohltit část dopadajícího akustického výkonu. Akustická pohltivost se mění s frekvencí, značíme ji α a nabývá hodnot 0..1. V praxi se můžeme setkat i s akustickou pohltivostí větší než 1, ale to bývá zpravidla zapříčiněno zvětšenou plochou povrchu vzorku různým tvarováním (výstupky či vlnami). Činitel zvukové pohltivosti charakterizuje schopnost plochy pohlcovat zvuk. Je to bezrozměrná veličina definovaná jako poměr zvukové energie pohlcované určitou plochou E_a ku energii na tuto plochu dopadající E_i [20].

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (1)$$

Pokud je $\alpha = 1$, pak plocha veškerý zvuk pohltí, pokud je $\alpha = 0$, pak se zvuk dokonale odrazí.



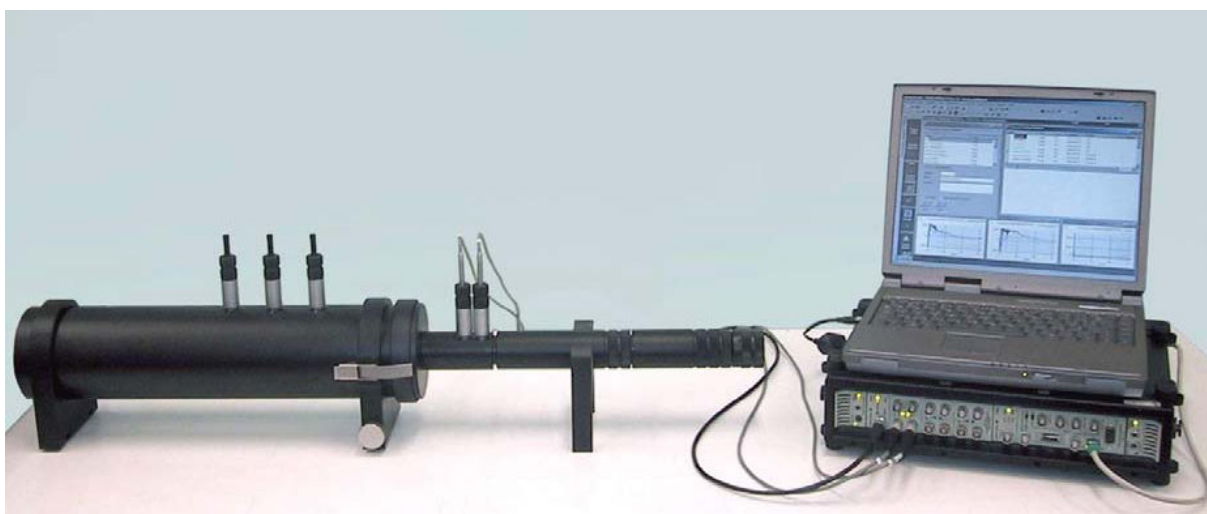
Obr. 32 Proces pohlcování zvuku[21]

α	činitel zvukové pohltivosti
E_i	energie dopadající na plochu
E_r	energie plochou odražená
E_a	Energie plochou pohlcená

Měření pohltivosti

Pro tento druh měření byla využita impedanční trubice k měření akustické pohltivosti materiálu. Obecně lze impedanční trubici popsat jako speciální kovovou trubici s reproduktorem sloužícím jako zdroj zvukových vln. Trubice je opatřena otvory sloužícími k vkládání mikrofónů a otvorem pro vkládání vzorku zkoumaného materiálu. Měření akustické pohltivosti lze provádět pro jednotlivé frekvence samostatně, nebo širokopásmově při použití bílého šumu jako zdroje signálu pro zabudovaný reproduktor.

Na následujícím obrázku č. 33 je zobrazena použitá impedanční trubice s šestikanálovým analyzátozem Pulse 3560 C a s počítačem, na kterém je provozován dodávaný software „Material testing“[20].



Obr. 33 Impedanční trubice[20]

Dvumikrofonová impedanční měřicí trubice slouží k měření akustických parametrů zkoušených materiálů. Pomocí impedanční trubice lze zjišťovat akustickou pohltivost materiálu, odrazivost a impedanci v rozsahu frekvencí 50 Hz až 6,4 kHz.

Dvumikrofonová metoda měření akustické pohltivosti je založena na rozkladu širokopásmového náhodného signálu do signálu ze zdroje (P_i) a signálu odraženého (P_r). Zvukový signál je vytvářen reproduktorem a rozklad signálu na signál ze zdroje a odražený signál je zjišťován ze závislosti mezi akustickými tlaky, které jsou měřeny dvojicí mikrofónů umístěných ve stěně trubice. Ze signálů od zdroje a z odraženého signálu měřených jako akustické tlaky dvěma mikrofony v daných pozicích jsou vypočteny tři frekvenční přenosové funkce:

H_1 frekvenční přenosová funkce

H_i frekvenční přenosová funkce spojená se složkou signálu od zdroje

H_r frekvenční přenosová funkce spojená se složkou odraženého signálu[20]

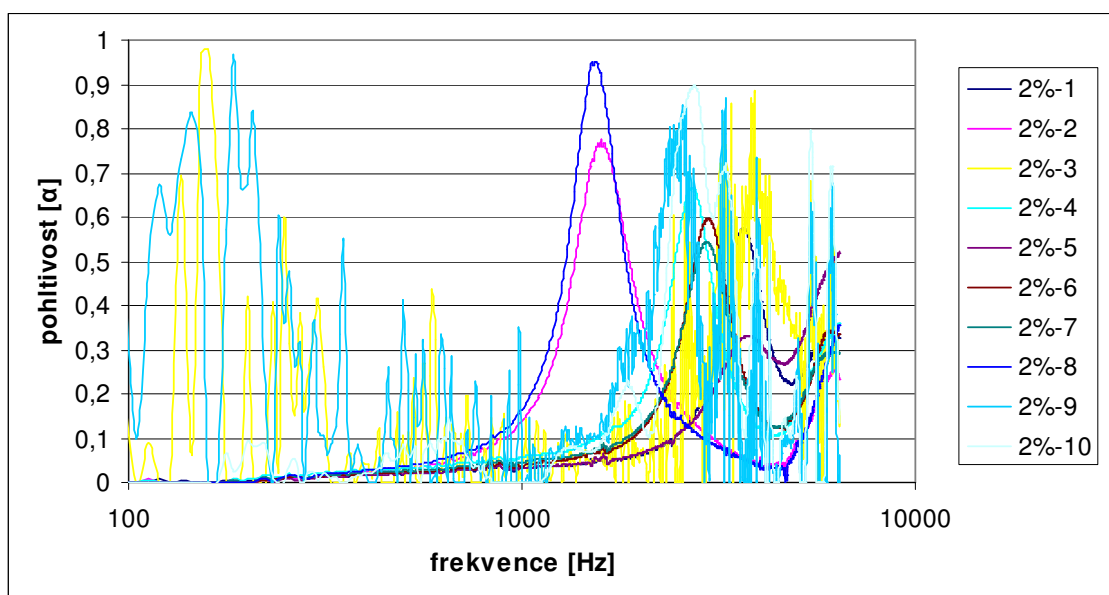
Měření akustické pohltivosti dvoumikrofonovou metodou předpokládá šíření rovinných vln a žádné úniky energie způsobené pohltivostí stěn impedanční trubice. Tato zjednodušení nejsou při praktických měřeních nijak omezující, jen v případě měření vzorku s velmi malou akustickou pohltivostí (0,01 – 0,1) jsou výsledky zatíženy větší chybou. Tato chyba je však snadno odstranitelná opakovaným měřením a následným zprůměrováním naměřených hodnot.

Kalibrace

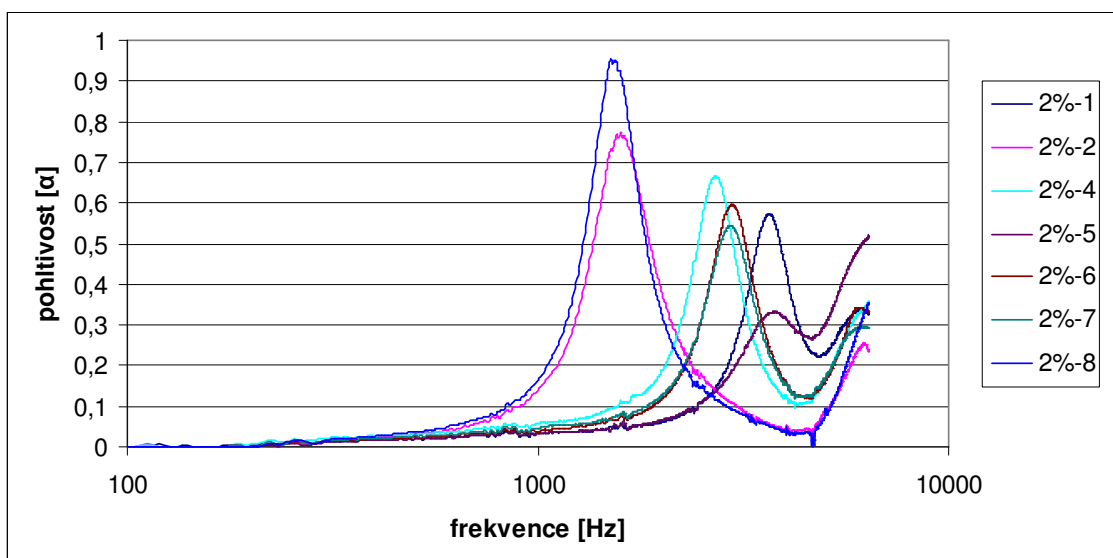
Před začátkem měření je nutné provést poněkud složitější kalibrační proces. Tento proces se skládá z justování obou měřících mikrofonů, změření odstupu zvukového signálu v trubici od šumu okolí a zjištění korekční frekvenční přenosové funkce $HC[20]$.

Výsledné hodnoty

Po proměření vzorků v Impedanční trubici byly získané hodnoty převedeny do excelu, kde byla odstraněna špatná měření.

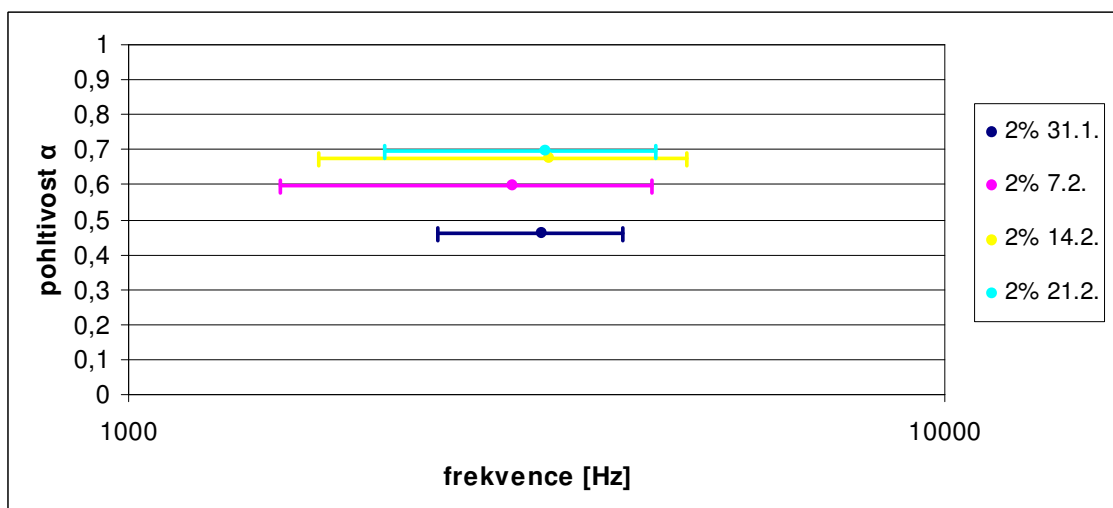


Obr. 34 Graf naměřených hodnot i se špatnými daty

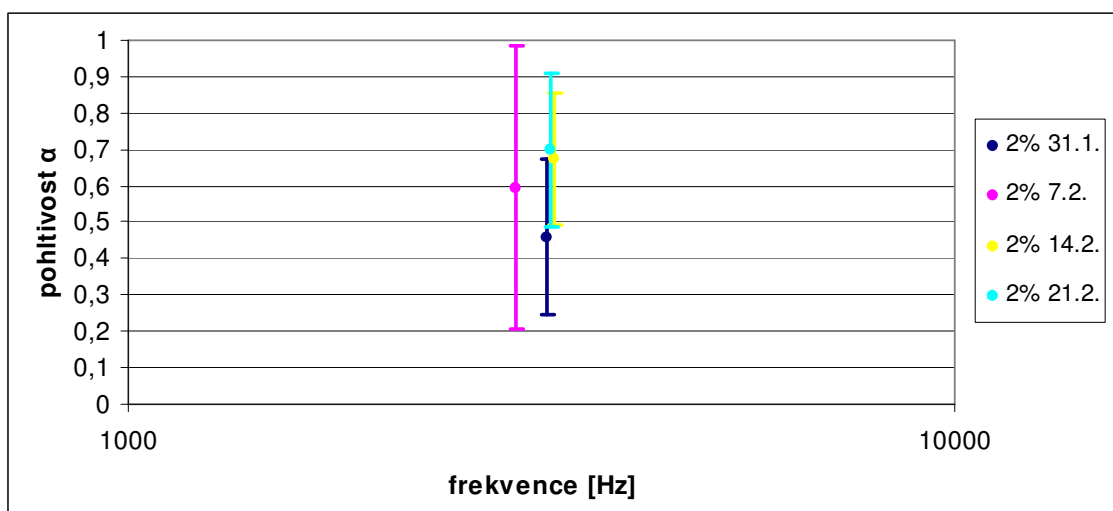


Obr. 35 Graf očištěné hodnoty od špatných měření

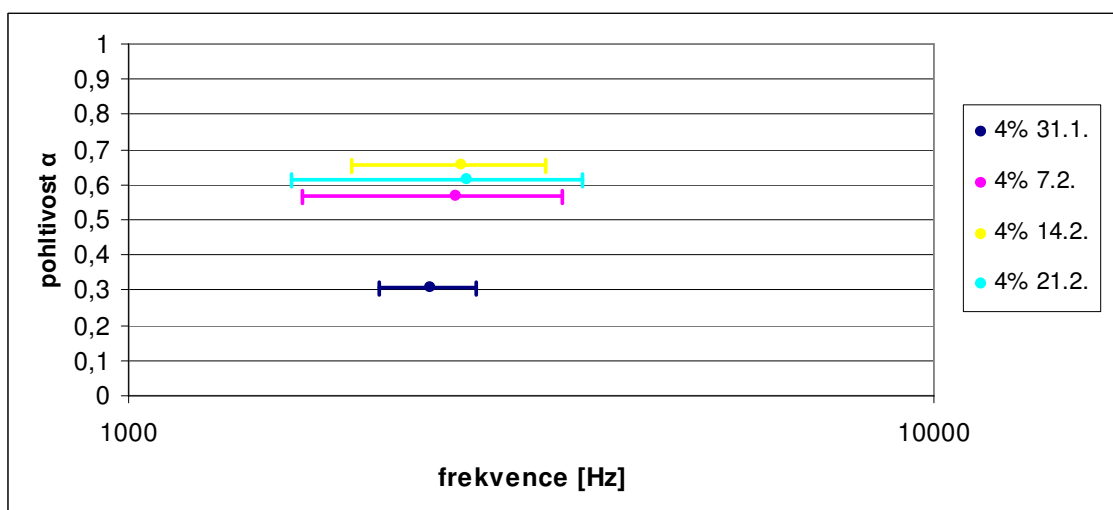
Po odstranění špatných měření byly odečteny z grafu hodnoty nejvyšší pohltivosti při určité frekvenci. Dále byla zpracována základní statistika těchto hodnot pomocí programu QC Expert. Po tomto statistickém zpracování byly zpracovány grafy s použitím mediánů a konfidenčních intervalů z QC Expertu.



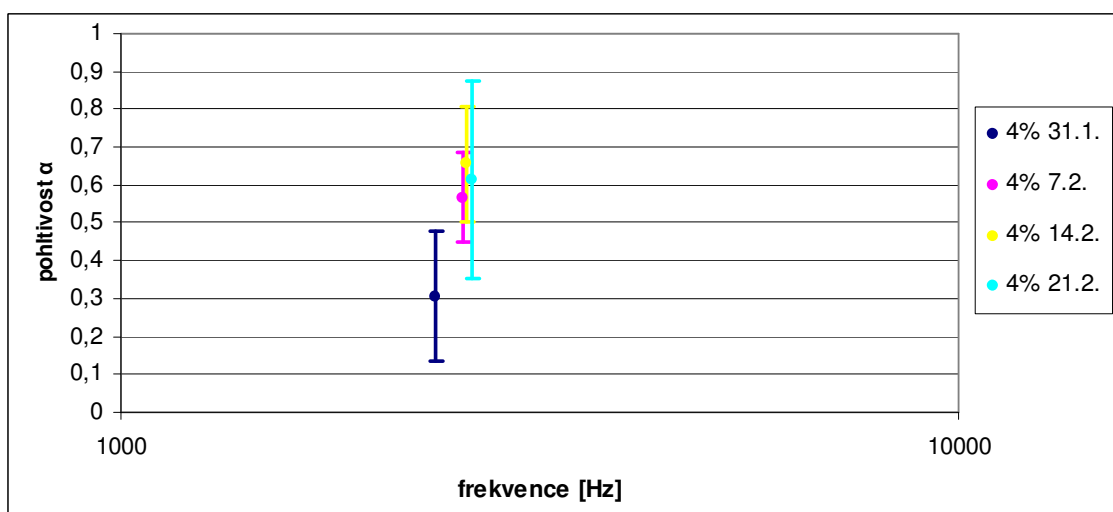
Obr. 36 Graf intervalů spolehlivosti frekvence pro 2% uhlíkových vláken



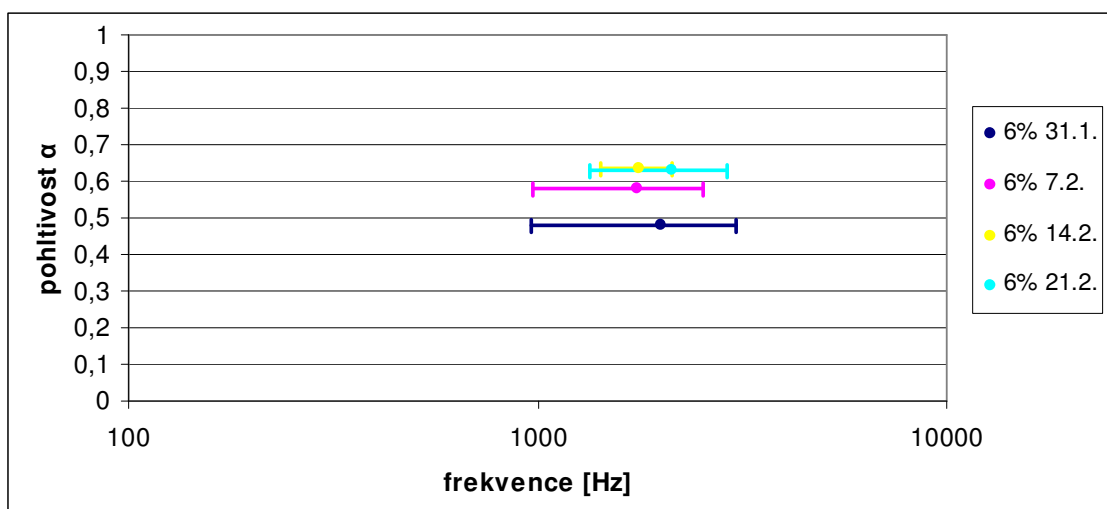
Obr. 37 Graf intervalů spolehlivosti pohltivosti pro 2% uhlíkových vláken



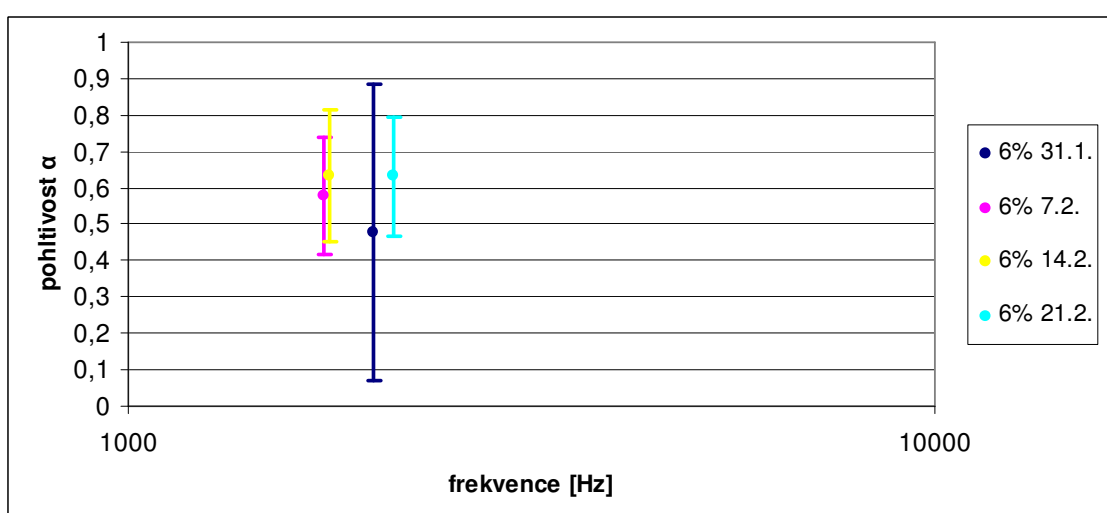
Obr. 38 Graf intervalů spolehlivosti frekvence pro 4% uhlíkových vláken



Obr. 39 Graf intervalů spolehlivosti pohltivosti pro 4% uhlíkových vláken



Obr. 40 Graf intervalů spolehlivosti frekvence pro 6% uhlíkových vláken



Obr. 41 Graf intervalů spolehlivosti pohltivosti pro 6% uhlíkových vláken

Diskuze k výsledkům

Grafy 36 - 41 vykazují určitou časovou závislost na stáří vzorků. Akustická pohltivost se se stářím vzorku zvyšuje až do čtvrtého týdne měření. Při čtvrtém týdnu měření začínají vzorky vykazovat stejnou, či podobnou akustickou pohltivost jako ve třetím týdnu. Při použití 6% vláken v geopolymerní matrici vzorky vykazují ustálenější průběh zvyšování akustické pohltivosti. Dále je vidět že větší procento vláken v kompozitech pohlcuje zvuk již při nižších frekvencích.

3.2.2 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost popisuje schopnost materiálu dobře vést elektrický proud. Udává velikost elektrického proudu procházejícího vodičem při jednotce napětí na koncích vodiče. Čím větší je vodivost, tím silnější elektrický proud prochází vodičem při stejném napětí. Dobrý vodič má vysokou hodnotu vodivosti, špatný vodič má nízkou hodnotu vodivosti. Elektrická vodivost je určena vztahem:

$$G = \frac{I}{U} \quad (2)$$

kde:

I je elektrický proud protékající vodičem [A]

U je elektrické napětí [V]

Převrácená hodnota elektrické vodivosti je elektrický odpor[22].

Elektrický odpor má vždy kladnou hodnotu. Dobré vodiče mají malý odpor, špatně vodivé materiály kladou velký odpor. Odpor vodičů se vzrůstající teplotou stoupá, ale u méně vodivých látek odpor se zvyšující se teplotou klesá. Vztah pro elektrický odpor dle Ohmova zákona je:

$$R = \frac{U}{I} \quad (3)$$

kde:

U je elektrické napětí [V]

I je elektrický proud protékající vodičem [A]

Ohmův zákon: napětí mezi konci vodiče je přímo úměrné proudu procházejícímu vodičem[24].

Povrchový elektrický odpor R_s je odpor materiálu měřený mezi dvěma elektrodami umístěnými na jeho povrchu.

Elektrický odpor plošné textilie:

$10^6 - 10^7 \Omega$ výborná

$10^7 - 10^8 \Omega$ velmi dobrá

$10^8 - 10^9 \Omega$ dobrá

$10^9 - 10^{10} \Omega$ průměrná

$10^{10} - 10^{11} \Omega$ sotva vyhovující

$10^{11} - 10^{14} \Omega$ nevyhovující

Rezistivita je materiálová konstanta, která charakterizuje elektrickou vodivost látky. Povrchová rezistivita je vztažena na plochu elektrod. Je to převrácená hodnota měrné vodivosti. Čím větší je rezistivita, tím menší je vodivost materiálu, a tím větší je elektrický odpor. Vztah pro povrchovou rezistivitu je:

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{o}{l} \quad (4)$$

kde:

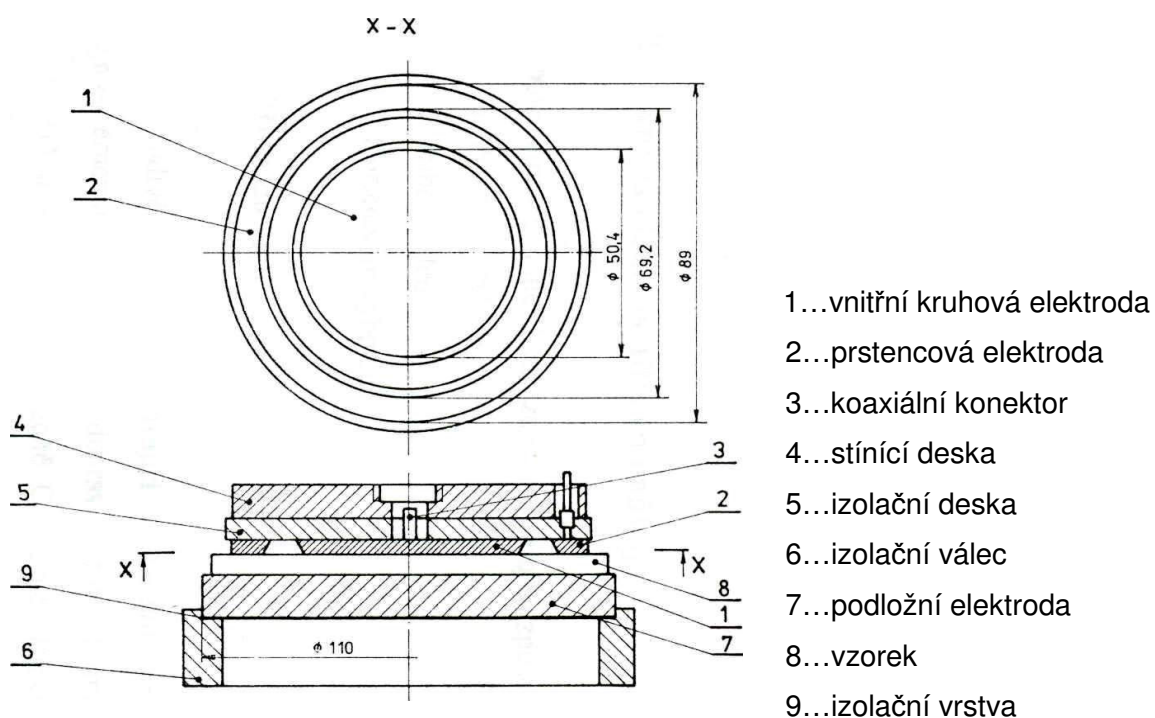
R_s je povrchový odpor [Ω]

o je střední obvod (resp. délka elektrod) [m]

l je vzdálenost elektrod [m][25]

Měření rezistivity

Měření bylo prováděno na tříelektrodovém koncentrickém systému pro měření povrchové a objemové rezistivity plošných textilií a měřícím přístrojem High Resistance Meter 4339B Hewlett Packard dle normy ČSN EN 61340 – 5[25].



Obr. 42 Tříelektrodový koncentrický systém pro měření povrchové a objemové rezistivity plošných textilií[25]



Obr. 43 Měřicí přístroje High Resistance Meter 4339B Hewlett Packard

Parametry měřicího přístroje:

- přesnost měřicího přístroje: $\pm (0,16\% + 100 \text{ mV})$ pro napětí $\leq 200 \text{ V}$
 $\pm (0,16\% + 500 \text{ mV})$ pro napětí $> 200 \text{ V}$
- měřicí rozsah přístroje: **R:** 1×10^3 až $1,6 \times 10^{16} \Omega$
I: 60 fA až 100 μA
U: 0,1V až 1000 V

Pro měření povrchové rezistivity textile je nutné znát hodnotu středního obvodu elektrod a vzdálenost elektrod. Délka elektrod byla 50 mm a vzdálenost elektrod byla 60 mm. Tyto hodnoty byly zadávány při měření povrchové rezistivity do měřicího přístroje. Poté je možné odečíst hodnoty povrchové rezistivity z přístroje bez následného přepočítávání naměřených dat.

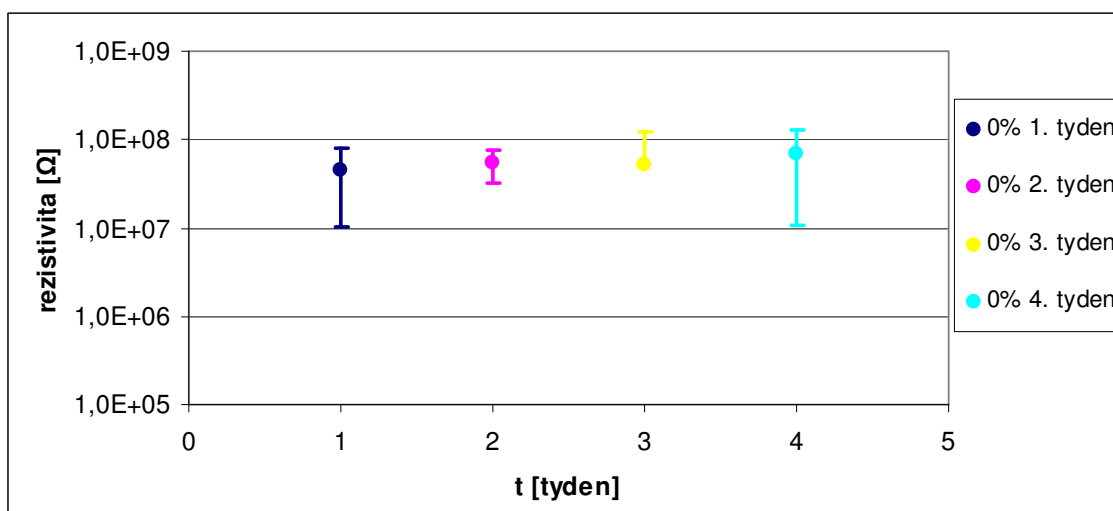
Elektrické napětí při měření bylo 1V. Jelikož měření je závislé na teplotě a vlhkosti, byly zaznamenány okolní podmínky při měření.

Tab. 3 Klimatické podmínky při měření

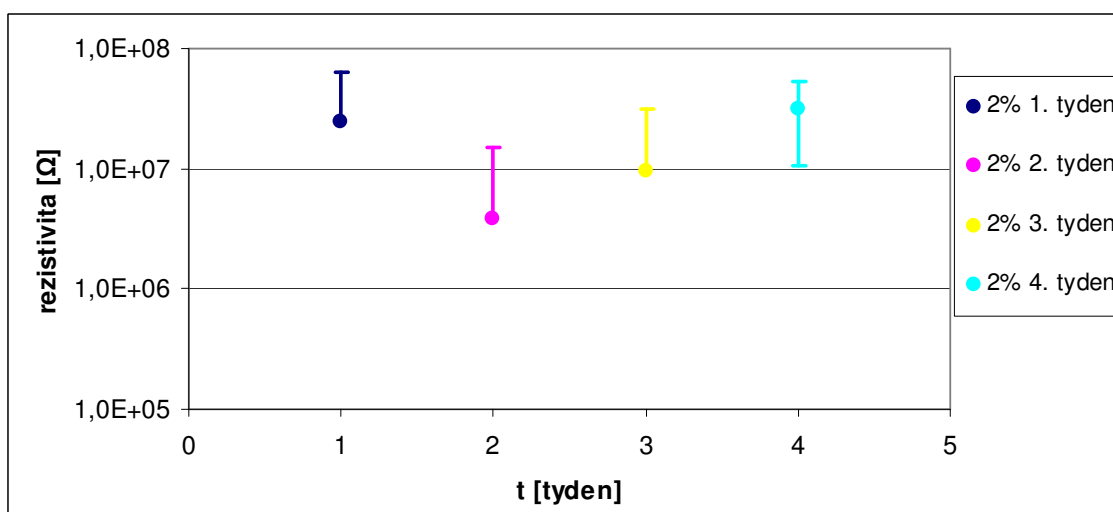
TÝDEN	TEPLOTA [°C]	VLHKOST [%]
1. týden	24 °C	30 %
2. týden	24,7 °C	25,2 %
3. týden	25 °C	23,5 %
4. týden	25,5 °C	21 %

Výsledné hodnoty

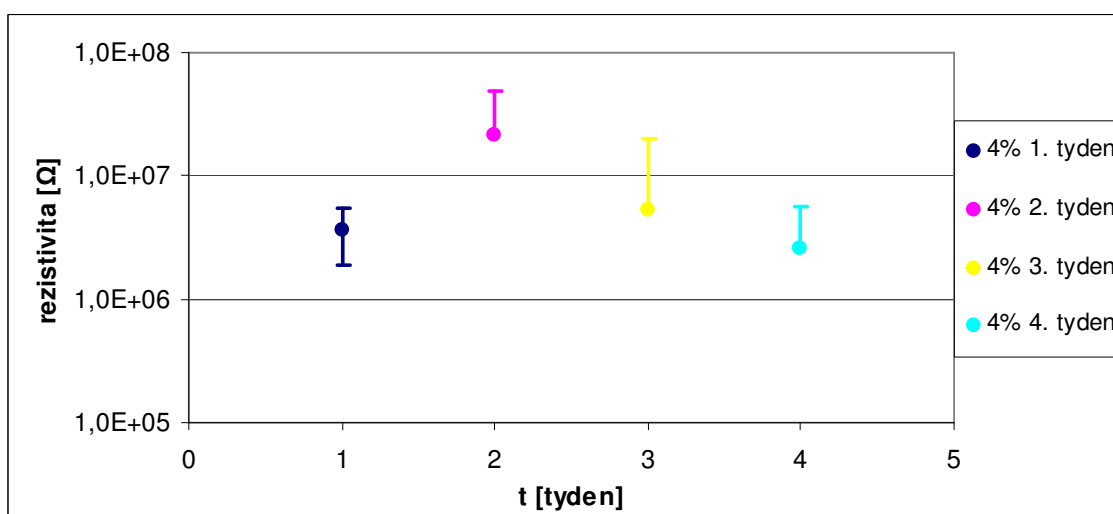
Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí statistického programu QC Expert. Při použití základních statistických výpočtů byly odstraněny vybočující hodnoty. Za použití mediánu a konfidenčních intervalů byly vyrobeny grafy.



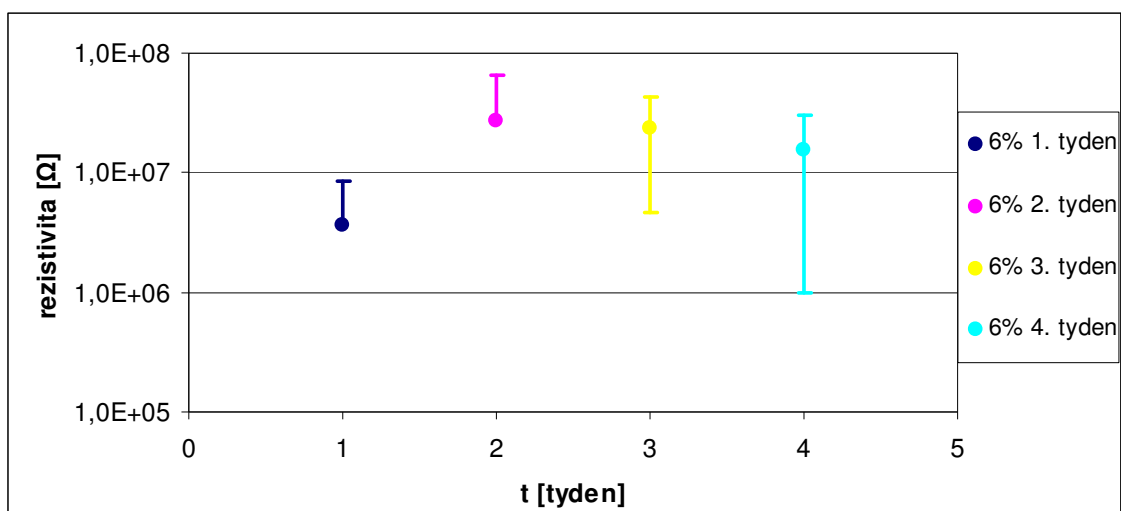
Obr. 44 Graf závislosti rezistivity na čase u vzorků s 0% uhlíkových vláken



Obr. 45 Graf závislosti rezistivity na čase u vzorků s 2% uhlíkových vláken



Obr. 46 Graf závislosti rezistivity na čase u vzorků s 4% uhlíkových vláken



Obr. 47 Graf závislosti rezistivity na čase u vzorků s 6% uhlíkových vláken

Diskuze k výsledkům

Měření nulové báze, čili samostatné matrice, bylo náročné, neboť po prvním týdnu matrice začala praskat. Bez příměsi uhlíkových vláken je čistá matrice velice křehká. Elektrická vodivost kompozitů s uhlíkovými vlákny je velice dobrá a s dobou stárí vzorků se příliš nemění. To je důležité pro využití v praxi.

3.2.3 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti materiálů (všeobecně) jsou jejich odezvou na mechanické působení vnějších sil. Vnější mechanické síly se mohou projevovat různě. Podle jejich působení lze hovořit o namáhání:

- na tah
- na tlak
- na ohyb
- na krut
- na střih

Tyto druhy namáhání se většinou vyskytují v kombinaci (tah - krut u vláken v zakrucované niti, tah - tlak při vlhkotepelném tvarování dvou vrstev plošných textilií, atp.). Laboratorně se tato namáhání zkoumají odděleně od sebe, přičemž normovány jsou pouze zkoušky pevnosti v tahu[27].

Podle rychlosti, s níž vnější síla působí, můžeme ještě namáhání posuzovat jako:

- statické, kde síla působí pomalu
- dynamické, kde síla působí rychle

a kromě toho na namáhání:

- jednorázové (do přetrhu)
- cyklické (bez přetrhu nebo do porušení).

Během mechanického namáhání dochází ke změně délky - deformaci, která je závislá na:

- velikosti zatížení
- rychlosti namáhání
- době trvání.

Mechanické vlastnosti se uplatní při zpracování, a proto jsou zařazovány rovněž mezi zpracovatelské vlastnosti.

Mechanické vlastnosti jsou popisovány tzv. ultimativními charakteristikami. Mezi ultimativní charakteristiky patří:

- pevnost (síla do přetrhu) F [N]
- napětí do přetrhu σ [Pa]

- protažení do přetrhu Δl [m]
- tažnost (deformace do přetrhu) ϵ [%][27]

Měření pevnosti

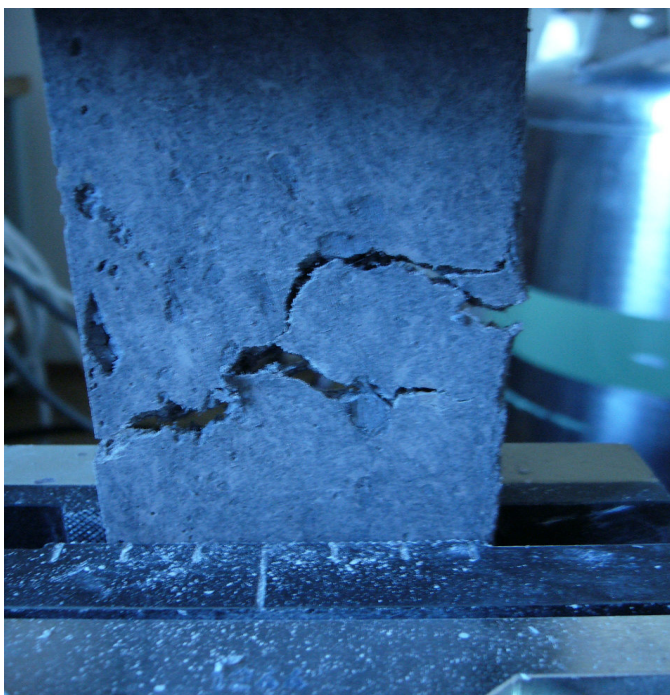
Měření bylo prováděno na přístroji TIRATEST 2300 pro měření mechanických vlastností. Přístroj je vybavený dvojicí svíracích čelistí, z nichž jedna čelist je pevná a druhá čelist se pohybuje konstantní rychlostí po celou dobu zkoušky, přitom ve zkušebním systému nedochází k žádnému ohybu. Celá šířka zkušebního vzorku je upnutá v čelistech zkušebního přístroje.

Podstata zkoušky: zkušební vzorek o stanovených rozměrech je protahován konstantní rychlostí až do přetržení. Zaznamenává se maximální síla nutná k přetržení švu, prodloužení, vykonaná práce, čas zkoušky, modul pružnosti a jiné předem zvolené vlastnosti.



Obr. 48 Dynamometr TIRATEST na katedře KTM

Pro zkoušku pevnosti v tahu byly vyrobeny vzorky dlouhé 15 cm, široké 5 cm a jejich tloušťka byla 1 cm. Čelisti byly nastaveny na upínací délku 10 cm a byly použity mechanické čelisti. Na obrázcích č. 49, 50 je ukázána destrukce vzorku při zkoušce.



Obr. 49 Zobrazení destrukce kompozitního dílu při tahovém namáhání



Obr. 50 Zobrazení destrukce kompozitního dílu při tahovém namáhání

Výsledky měření

Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí statistického programu QC Expert. Při použití základních statistických výpočtů byly odstraněny vybočující hodnoty. Z hodnot naměřených na dynamometru byly vypočítány hodnoty tahového napětí a modulu pružnosti dle vzorců:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (5)$$

kde:

σ je tahové napětí [Pa]

F je síla [N]

S je povrch [m²]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

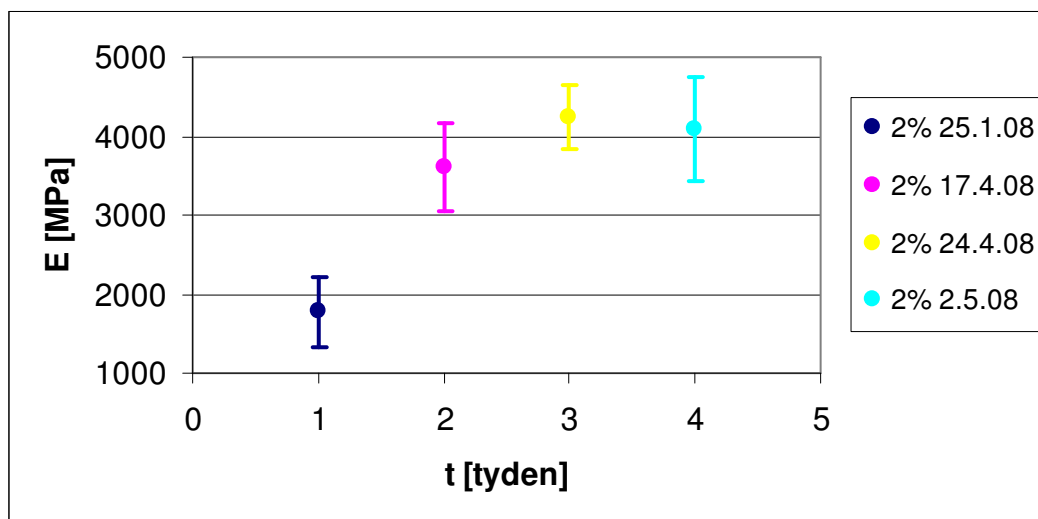
kde:

E je modul pružnosti [Pa]

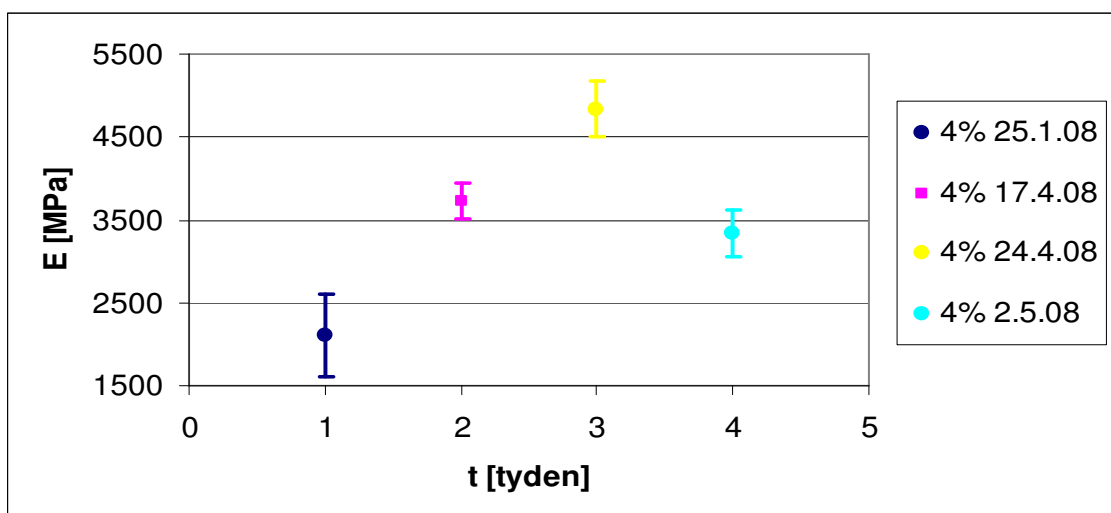
σ je tahové napětí [Pa]

ε je prodloužení [%]

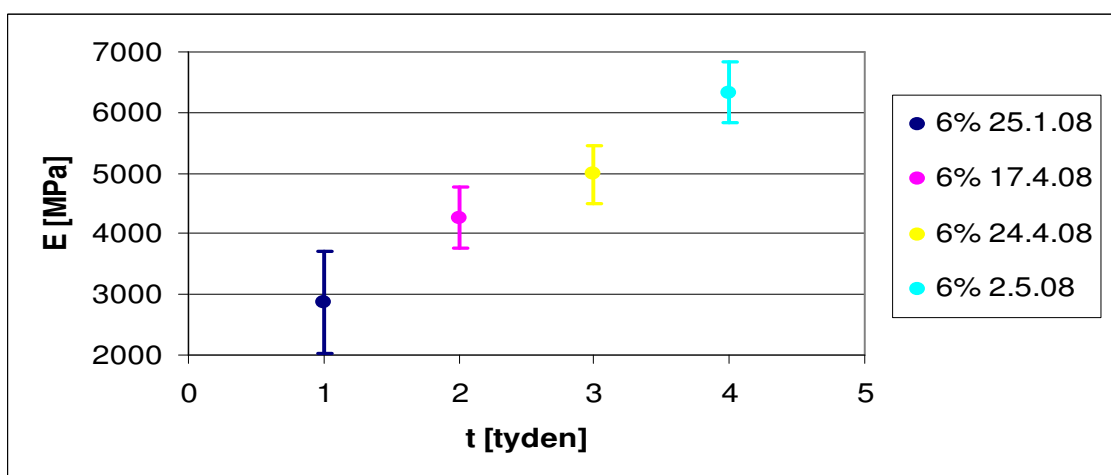
Za použití mediánu a konfidenčních intervalů byly zkonstruovány grafy.



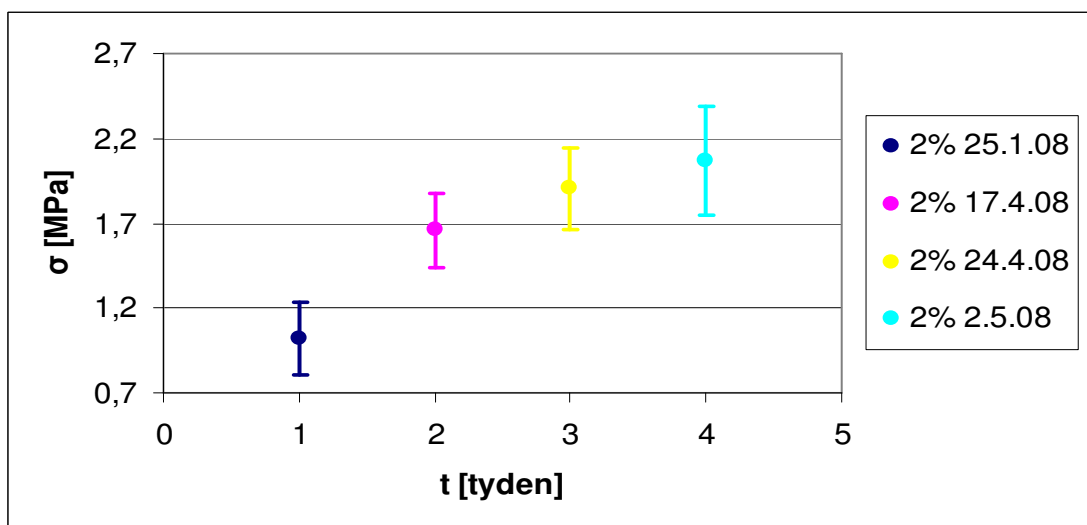
Obr. 51 Graf závislosti modulu pružnosti na čase u vzorků s 2% uhlíkových vláken



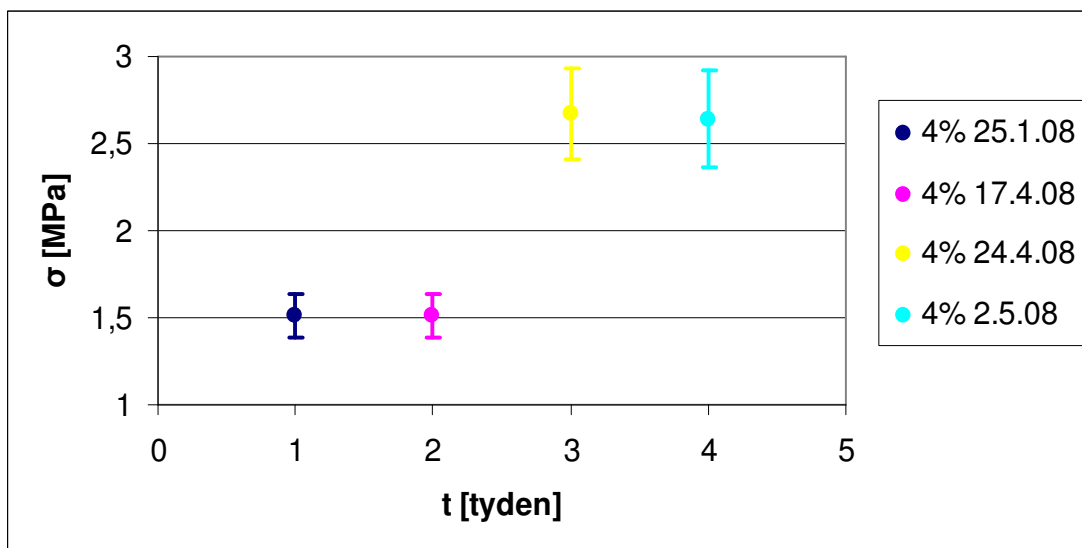
Obr. 52 Graf závislosti modulu pružnosti na čase u vzorků s 4% uhlíkových vláken



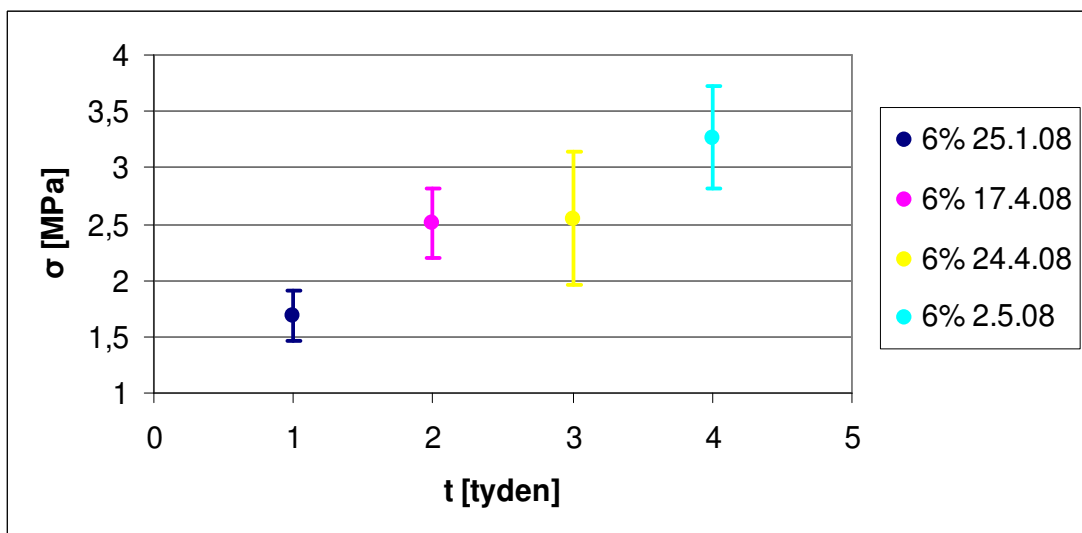
Obr. 53 Graf závislosti modulu pružnosti na čase u vzorků s 6% uhlíkových vláken



Obr. 54 Graf závislosti tahového napětí na čase u vzorků s 2% uhlíkových vláken



Obr. 55 Graf závislosti tahového napětí na čase u vzorků s 4% uhlíkových vláken



Obr. 56 Graf závislosti tahového napětí na čase u vzorků s 6% uhlíkových vláken

Diskuze k výsledkům

Jak u grafů modulu pružnosti, tak i u grafů tahového napětí je vidět rostoucí hodnoty se zvyšující se dobou stárí vzorků. U všech vzorků je růst hodnot přiměřený a ve čtvrtém týdnu poměrně ustálený, až na vzorky s obsahem 4% uhlíkových vláken v matrici. Zde se vlastnosti mění skokově a modul pružnosti ve čtvrtém týdnu prudce klesá pod hodnoty modulu pružnosti z třetího týdne měření. Nejvyšší hodnoty tahového napětí dosáhly vzorky s 6% uhlíkovými vlákny v matrici. Při měření byly do čelistí vkládány papírové podložky.

3.2.4 Tepelná vodivost

Měrná tepelná vodivost

Součinitel měrné tepelné vodivosti λ představuje množství tepla, které proteče jednotkou délky za jednotku času a vytvoří rozdíl teplot 1 K. S rostoucí teplotou teplotní vodivost klesá. Materiály, které mají vysokou tepelnou vodivost, se označují jako vodiče a materiály s nízkou tepelnou vodivostí se označují jako izolátory. Průměr vláken a tloušťka tepelnou vodivost zvyšují. Materiály z jemných vláken mají nejmenší tepelnou vodivost[28].

Plošný odpor vedení tepla

Plošný odpor vedení tepla r je dán poměrem tloušťky materiálu a měrné tepelné vodivosti. Udává nám, jaký odpor klade materiál proti průchodu tepla materiálem. Čím nižší je tepelná vodivost, tím vyšší je tepelný odpor.

$$r = \frac{h}{\lambda} \quad (7)$$

kde:

r odpor vedení tepla [$\text{W}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2$]

h výška materiálu [m]

λ tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Měrná teplotní vodivost

Měrná teplotní vodivost a vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat teplotu. Čím je hodnota vyšší, tím látka rychleji vyrovnává teplotu.

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (8)$$

kde:

a měrná teplotní vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

λ tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

c měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

ρ hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Tepelná jímavost

Tepelná jímavost b je parametr, který charakterizuje tepelný omak a představuje množství tepla, které proteče při rozdílu teplot 1 K jednotkou plochy za

jednotku času v důsledku akumulace tepla v jednotkovém objemu. Jako chladnější počítujeme hmatem takový materiál, který má větší tepelnou jímavost.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (9)$$

kde:

b koeficient tepelné aktivity [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}^{-1}$]

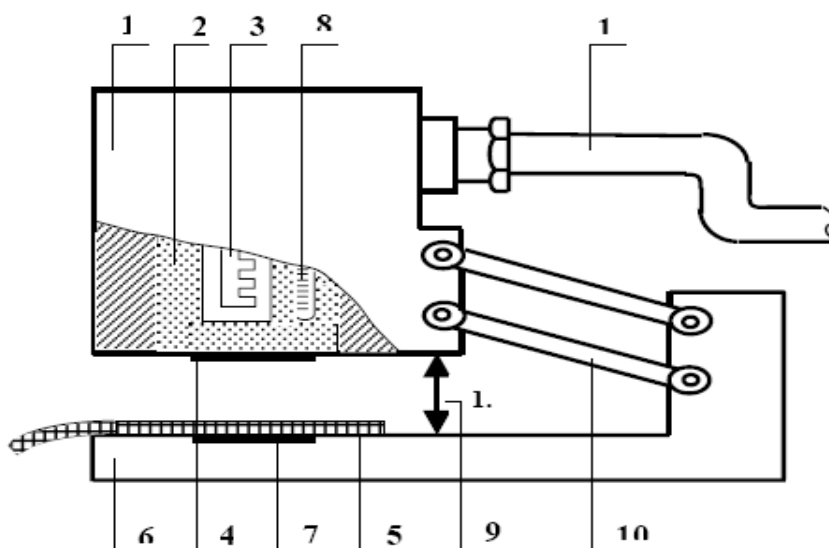
λ tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

c měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

ρ hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Měření tepelné vodivosti

Měření se provádělo na přístroji ALAMBETA, které spočívá v průchodu tepelných toků povrchy vzorku od neustáleného stavu k ustálenému. ALAMBETA je počítačem řízený poloautomat, který vypočítá všechny statistické parametry měření a obsahuje autodiagnostický program, který zabraňuje chybným operacím přístroje[28].



Obr. 57 Schéma přístroje ALAMBETA[28]

Legenda:

1. Hlavice
2. Termostat
3. Topné těleso
4. Snímač tepelného toku
5. Měřený vzorek
6. Základna přístroje
7. Snímač tepelného toku
8. Teploměr

Parametry přístroje:

Rozměry: 200x500x300mm

Hmotnost: 15 kg

Příkon: 60 VA

Provozní podmínky: Teplota 18 – 23 °C

Relativní vlhkost 10 – 80 %

Přítlak hlavice: měnitelný v rozsahu 100 – 1000 Pa,

Tloušťka vzorku: 0,5 – 8 mm

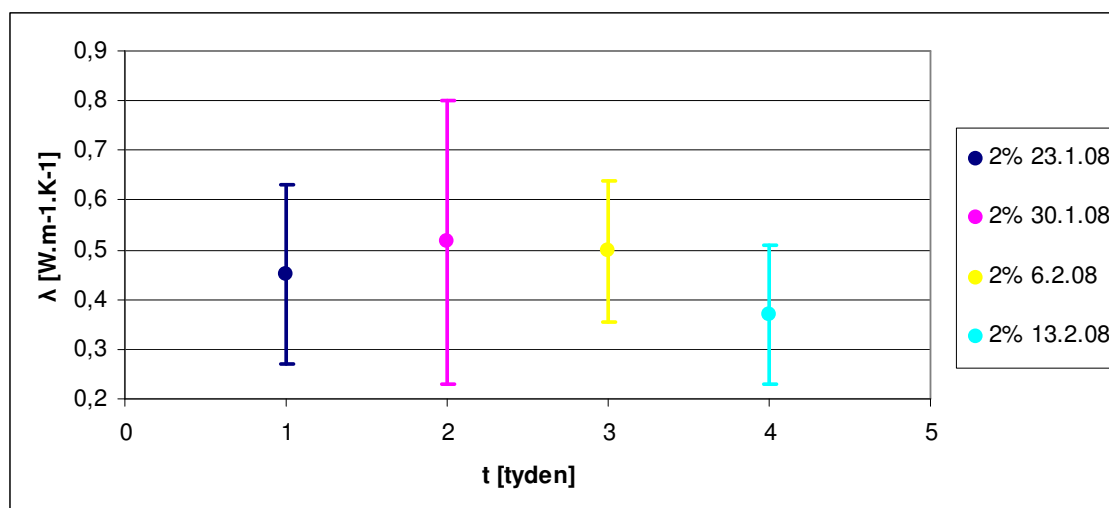
Rozměr vzorku: minimálně 10 x 10 mm

Doba měření: 10 – 100 sec[28].

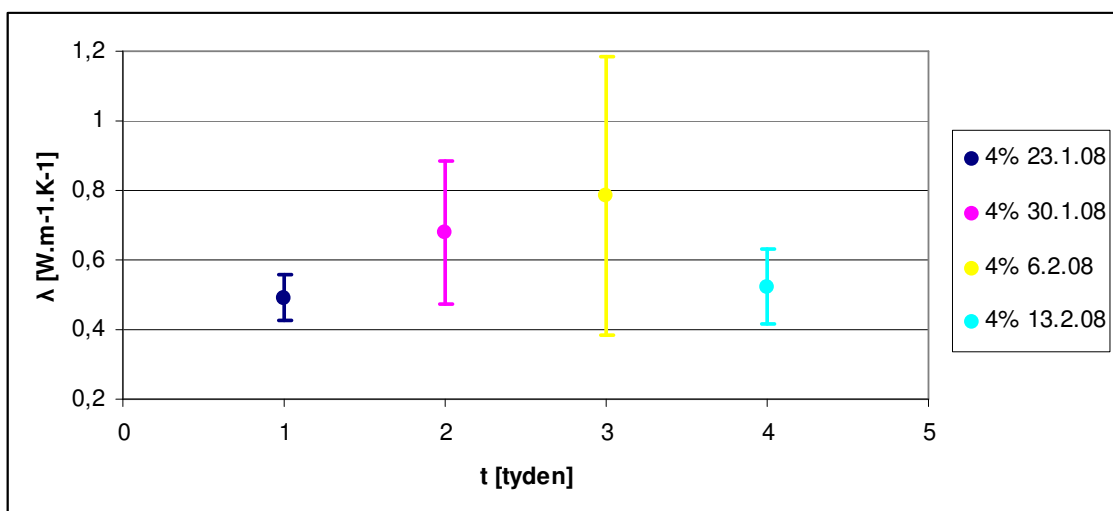
Vzorky před měřením byly obroušeny o jemný smirkový papír pro docílení hladkého povrchu, který je důležitý při měření. Nerovný povrch může způsobit poškození senzoru a nepřesnosti v měření. Měření bylo prováděno za použití přítlaku 1000 Pa., při měření byla použita silikonová pasta.

Výsledky měření

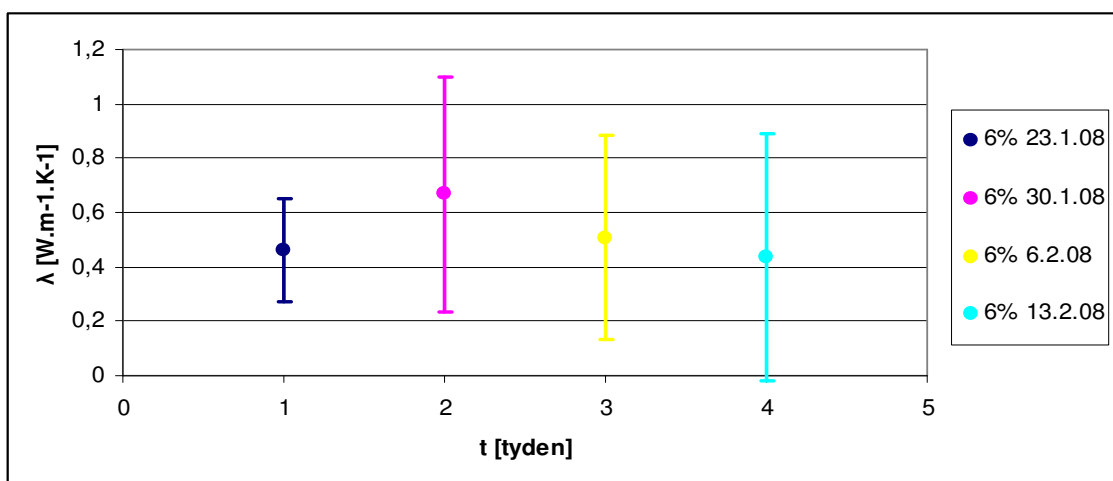
Z naměřených hodnot byly spočítány základní statistické parametry - průměr, rozptyl, směrodatná odchylka, variační koeficient a intervaly spolehlivosti dle Hornova postupu (pivotační metoda) (viz příloha).



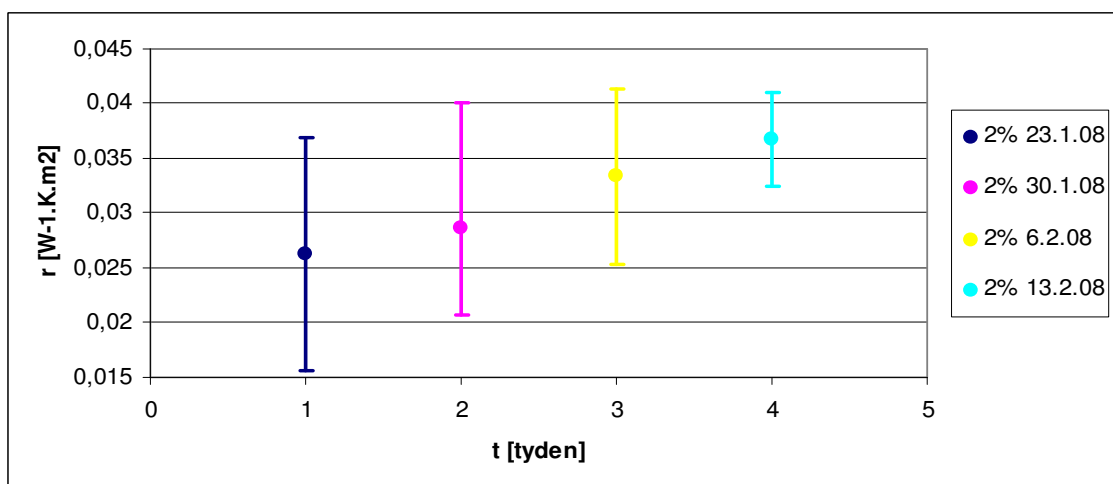
Obr. 58 Graf závislosti tepelné vodivosti na čase u vzorků s 2% uhlíkových vláken



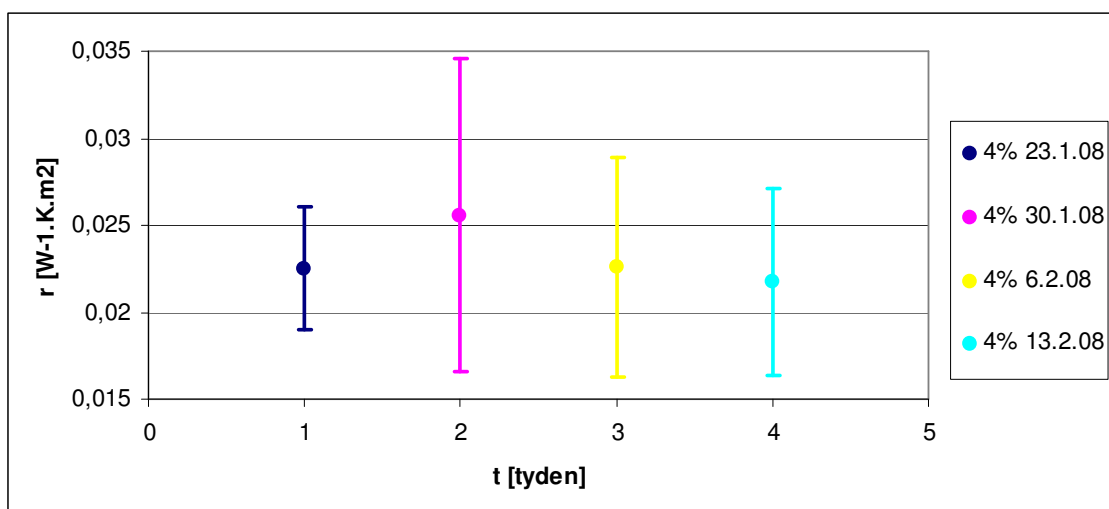
Obr. 59 Graf závislosti tepelné vodivosti na čase u vzorků s 4% uhlíkových vláken



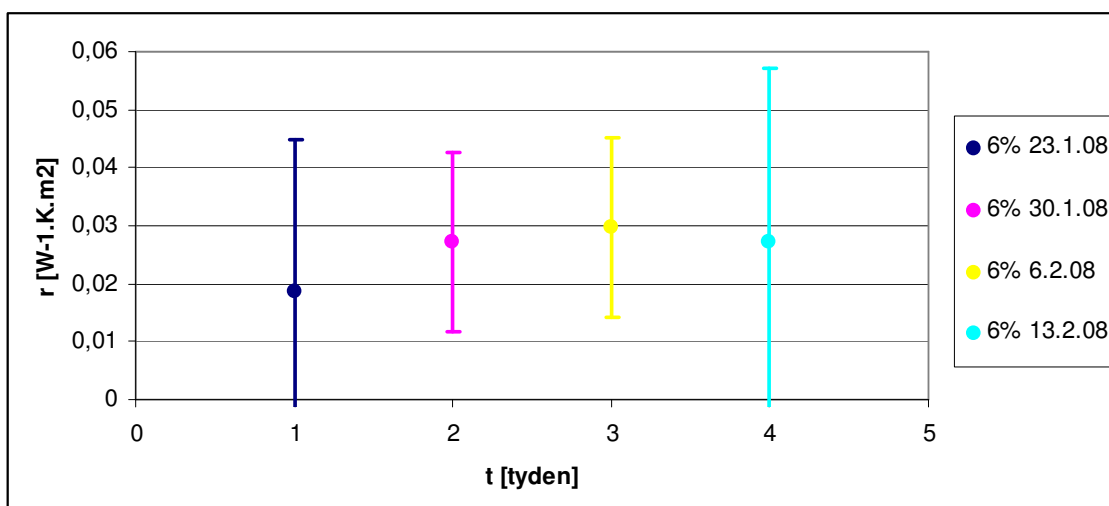
Obr. 60 Graf závislosti tepelné vodivosti na čase u vzorků s 6% uhlíkových vláken



Obr. 61 Graf závislosti plošného odporu vedení tepla na čase u vzorků s 2% uhlíkových vláken



Obr. 62 Graf závislosti plošného odporu vedení tepla na čase u vzorků s 4% uhlíkových vláken



Obr. 63 Graf závislosti plošného odporu vedení tepla na čase u vzorků s 6% uhlíkových vláken

Diskuze k výsledkům

Z důvodu malého počtu měření nebylo možné naměřené hodnoty zpracovat ve statistickém programu QC Expert. Pro malý počet měření nebyly prováděny další statistické výpočty - homogenita dat a očištění dat od odlehlých hodnot. Z důvodu životnosti měřícího přístroje bylo provedeno pouze šest měření.

Měrná tepelná vodivost je u všech vzorků podobná, průběh v čase se výrazně nemění. Plošný odpor vedení tepla u vzorků s 2 a 6% má tendenci se zvyšovat s dobou stárí vzorků. Intervaly spolehlivosti jsou vysoké z důvodu velkého rozptylu naměřených hodnot.

4. Závěr

V současné době je vývoj nových materiálů rychlý a postupuje stále kupředu. Dodává materiálům nové funkce a zlepšuje jejich vlastnosti. S kompozitními materiály se můžeme setkat všude ve svém okolí, najdeme je ve zdravotnictví, stavebnictví, sportovních oborech, letectví, kosmonautice, strojírenství, automobilovém průmyslu a dalších odvětvích. I budoucnost bude nadále patřit lehkým, přesto dostatečně tuhým konstrukcím, konstrukcím dostatečně zatíženým, přesto dostatečně pevným.

Kompozity jsou materiály složené ze dvou složek, z matrice, která působí v materiálu jako pojivo, a z výztuže, která je v materiálu nositelem pevnosti. Dle druhu výztuže a matrice můžeme vyrábět různé kompozity pro široký okruh použití. Složený materiál je navrhován tak, aby měl výsledné vlastnosti několikanásobně lepší, než mají samostatné složky. Vzhledem k všestrannému využití těchto materiálů a diametrálně vyšším vlastnostem lišícím se od běžných materiálů si kompozity našly místo v našem běžném životě a jsou jejich nepostradatelnou součástí.

Tato diplomová práce vznikla za spolupráce s firmou Kamenia s.r.o na výrobu atypických obkladových a tepelně odolných materiálů. Hlavním cílem práce bylo prověřit vlastnosti uhlíkových kompozitních materiálů s geopolymerní matricí v závislosti na čase. Tyto vlastnosti byly měřeny na čerstvých vzorcích, a pak v každém následujícím týdnu po dobu čtyř týdnů. Vzorky byly uchovávány v igelitu pro zajištění zrání vzorků při teplotě minimálně nad 15 °C. Při nižších teplotách se zastaví proces zrání a výrobek je znehodnocen.

Jednou z prvních vlastností, která byla zkoumána, byla akustická pohltivost. Měření probíhalo v impedanční trubici, jež je popsána v experimentální části. Výsledky ukázaly, že doba zrání je pro tuto vlastnost důležitá. S rostoucí dobou stárí se zvyšovala zvuková pohltivost. Růst zvukové pohltivosti se ustálil mezi třetím a čtvrtým týdnem. Dále bylo zjištěno, že s vyšším procentem uhlíkových vláken v matrici začíná materiál pohlcovat zvuk již při nižších frekvencích.

Další měření se týkalo měření elektrické vodivosti pomocí přístroje zvaného ohmmetr. Zde se zkoušely měřit vzorky bez přídavku uhlíkových vláken, jen čistá matrice, ale tyto vzorky s delší dobou stárí více a více praskaly. Pro jiné druhy měření nebyly tyto vzorky vyráběny z důvodu nestability. Při měření bylo zjištěno, že doba zrání nemá vliv na elektrickou vodivost. Elektrická vodivost kompozitů s obsahem uhlíkových vláken je velmi dobrá a s delším časem zrání vzorku tato vlastnost neklesá. Vodivost těchto kompozitů byla srovnávána s čistým geopolymerním bez přídavku uhlíkových vláken. Při tomto měření se výrazně nelišila elektrická vodivost ani ku použitému procentu vláken v geopolymerním.

Následné měření rozepsané v experimentální části zkoumalo mechanické vlastnosti. Pevnost v tahu byla měřena na dynamometru s mechanickými čelistmi. Zde výsledky měření ukázaly změnu hodnot závislou na čase. Se zvyšujícím se stářím vzorku se zvyšuje jak modul pružnosti, tak i tahové napětí. S přibývajícím podílem uhlíkových vláken v kompozitu roste jejich pevnost a také následně i tahové napětí. Nejvyšší tahové napětí mají materiály s obsahem 6% uhlíkových vláken.

Posledním druhem měření, které bylo provedeno a popsáno v experimentální části, je měření tepelné vodivosti. Tepelné vlastnosti byly měřeny na přístroji ALAMBETA. Z důvodu životnosti stroje bylo naměřeno málo hodnot, proto nebylo možné plné statistické zpracování výsledů. Výsledné hodnoty nejsou jednoznačně průkazné o vlastnostech materiálu. Při měření vznikla odlehlá data. Kolísavé hodnoty jsou dány jednak nerovným povrchem kompozitu, tak i vlhkostí měřeného materiálu a netextilním charakterem měřeného materiálu. Ze zpracovaných dat, která se nedají brát za směrodatné výsledky, lze vyčíst, že tepelná vodivost se s časem doby zrání výrazně nemění.

Závěrem můžeme říci, že z proměření základních vlastností kompozitu lze vyvodit, že doba zrání ovlivňuje kvalitu výrobků. Stejně tak i použité procento uhlíkových vláken je v některých případech důležité pro využití výrobku. Nejlepší hodnoty vyšly pro materiály s 6% uhlíkových vláken. Pro další zpracování tohoto tématu bych doporučila navrhnout jinou metodu měření tepelných vlastností materiálu nebo nalézt jiné zařízení pro tento druh měření.

Použitá literatura

- [1] TOMKOVÁ, Blanka : Kompozity s textilní výztuží. *Přednášky z předmětu Kompozity s textilní výztuží. KTM TU v Liberci. 2008*
- [2] KORINEK, Z. : Definice, rozdělení a historie kompozitních materiálů. [online] [cit. 10. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>>
- [3] Kompozity a jejich použití. [online] [cit. 10. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.kmt.vslib.cz/sekce/doplňky/kompozity%20a%20jejich%20pouziti.pdf>>
- [4] MICHNA, Štefan : Kompozitní materiály. *KTMI Univerzita J.E. Purkyně, Ústí nad Labem.* [online] [cit. 10. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.stefanmichna.com/>>
- [5] LAŠ, Vladislav : Mechanika kompozitních materiálů: 1 Úvod. *Západočeská univerzita v Plzni. 2006.* [online] [cit. 10. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.kme.zcu.cz/download/mkm/1-uvod.ppt>>
- [6] MUNZAROVA, P., ŽÁČKOVÁ, I.,: Využití uhlíkových kompozitů v Letectví. *Semestrální práce do předmětu Kompozity s textilní výztuží. KTM TU v Liberci. 2008*
- [7] Textile fibres. [*Fotografie z rastrovacího elektronového mikroskopu.*] *KTM TU v Liberci 2008*
- [8] MILITKÝ, Jiří : Textilní vlákna. *Skriptum . TU v Liberci 2002*
- [9] Uhlíkové vlákno. [online] [cit. 10. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno>
- [10] MILITKÝ, Jiří : Speciální vlákna. *Skriptum. TU v Liberci 2004*
- [11] GRÉGR, Jan : Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken. Zpráva pro Výzkumné centrum „Textil“. TU v Liberci 2004
- [12] Pyramidy jsou z tvárnic. [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://vikend.ihned.cz/1-10000070-18802110-v00000_d-95>

[13] Geopolymer Valley. [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://www.enviweb.cz/?env=horniny_archiv_gfecd>

[14] Geopolymery a jejich použití pro nakládání s odpady. [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: [http://odpady.servis.ihned.cz/c4-10066110-18251200-E00000_d-geopolymery-a-jejich-pouziti-pro-nakladani-s-odpady]

[15] LAŠ, Vladislav : Mechanika kompozitních materiálů: 2 Výroba. *Západočeská univerzita v Plzni. 2006.*

[16] Materiálové listy firmy KUREHA

[17] Polymerace. [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://projektalfa.ic.cz/polymerace.htm>>

[18] Metakaolin. [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.svcement.cz/>>

[19] Vodní sklo. [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.setuza.cz/cz/prod/oleochemie/vodnisklo.htm>>

[20] NOVÁK, Jan, KALINOVÁ, Klára : Měření akustické pohltivosti. [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2004/DIAGO-Mereni%20akusticke%20pohltivosti-No-Ka.pdf>

[21] ŠKOLOUDOVÁ, Alena, HOUŠKOVÁ, Vendula : Parametry zvukově pohltivých materiálů. *Semestrální práce do předmětu Mechanická technologie výroby netkaných textilií. TU v Liberci 2007*

[22] Elektrická vodivost. [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_vodivost>

[23] Elektrický odpor. [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_odpor>

[24] Ohmův zákon [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?page=241&sekce=browse>>

[25] Rezistivita [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistivita>>

[26] Přístroj pro měření rezistivity [online] [cit. 12. 4. 2008] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.bellnw.com/products/3762/>>

[27] KOVAČIČ, Vladimír : Zkoušení textilií. *Skriptum. TU v Liberci*

[28] VRBOVÁ, Ivana : Měření tepelných vlastností na přístroji ALAMBETA. *Výzkumné centrum „Textil“. TU v Liberci 2002*

Seznam příloh

Příloha č. 1

Hornův postu pro konstrukci intervalů spolehlivosti pro malé výběry dat podle vzorců 11 – 17.

Příloha č. 2

Vytvořené grafy 63 – 74 z hodnot získaných z impedanční trubice. Tabulky 4 – 15 s hodnotami pro konstrukci intervalů spolehlivosti k mediální hodnotě dat.

Příloha č. 3

Tabulka 16 získaných hodnot při měření na ohmmetru.

Příloha č. 4

Grafy 75 – 77 prodloužení do přetrhu vzorků s konfidenčními intervaly sestrojenými k mediální hodnotě dat. Tabulky 17 – 19 s hodnotami pro konstrukci grafů.

Příloha č. 1

Hornův postu nebo-li metoda založená na pivotech

Pro měření malých výběru dat, $4 \leq n \leq 20$.

1) setřídít data vzestupně $X_1 \leq X_2 \leq X_3 =$ variační řada

2) určení hloubek

$$H_1 = \frac{\inf [(n+1)/2]}{2} \quad (11)$$

$$H_2 = \frac{\inf [(n+1)/2 + 1]}{2} \quad (12)$$

3) určení pivotů

$$X_L = X_{(H)} \quad (13)$$

$$X_U = X_{(n+1-H)} \quad (14)$$

odhad střední hodnoty

$$\hat{\mu} = 0,5 * (X_L + X_U) \quad (15)$$

4) Intervaly spolehlivosti pro 95%

$$L_D = \hat{\mu} - T_n^* (X_U - X_L) \quad (16)$$

$$L_H = \hat{\mu} + T_n^* (X_U - X_L) \quad (17)$$

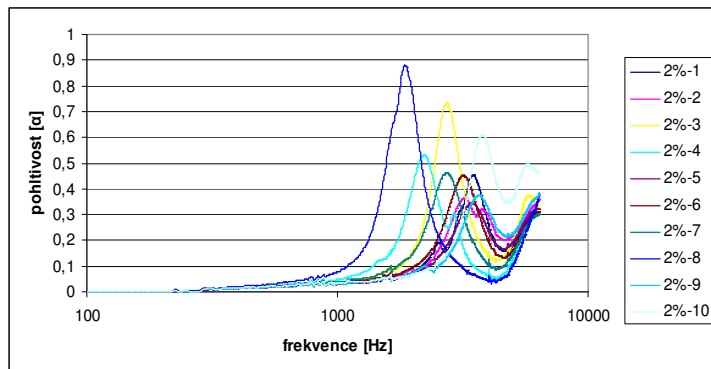
Konstanty T_n

4 – 0,738	10 – 0,668	16 – 0,435
5 – 2,094	11 – 0,545	17 – 0,502
6 – 1,035	12 – 0,483	18 – 0,451
7 – 0,72	13 – 0,608	19 – 0,423
8 – 0,564	14 – 0,525	20 – 0,397
9 – 0,915	15 – 0,466	

Příloha č. 2

Grafy akustické pohltivosti

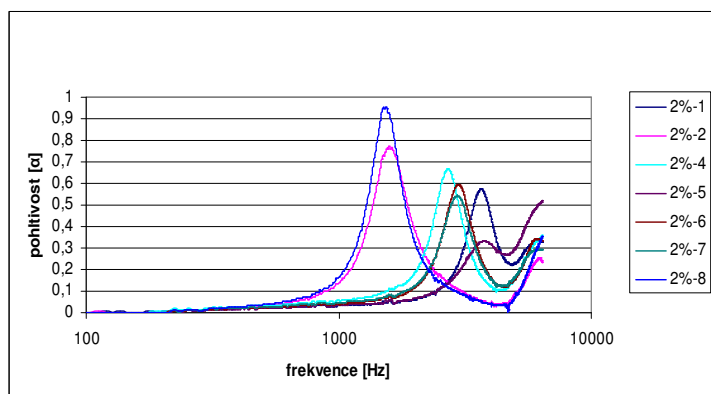
Tab. 4 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	2% 31.1.	2% 31.1.
Medián	3216	0,45972798
IS spodní	2398,838423	0,24720573
IS horní	4033,161577	0,67225022

Obr. 63 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 2% uhlíkových vláken v 1. týdnu měření

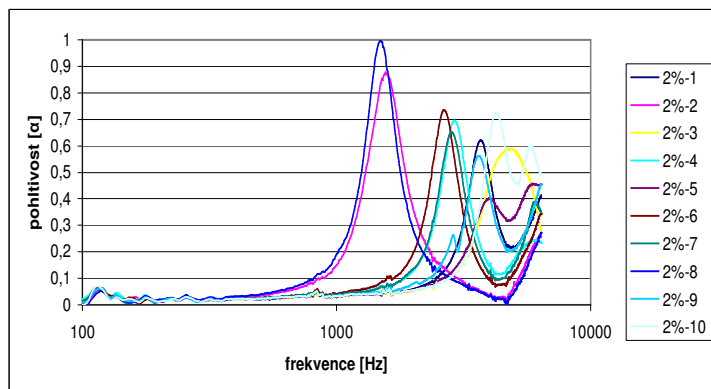
Tab. 5 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	2% 7.2.	2% 7.2.
Medián	2952	0,595296682
IS spodní	1533,763816	0,207889376
IS horní	4370,236184	0,982703988

Obr. 64 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 2% uhlíkových vláken v 2. týdnu měření

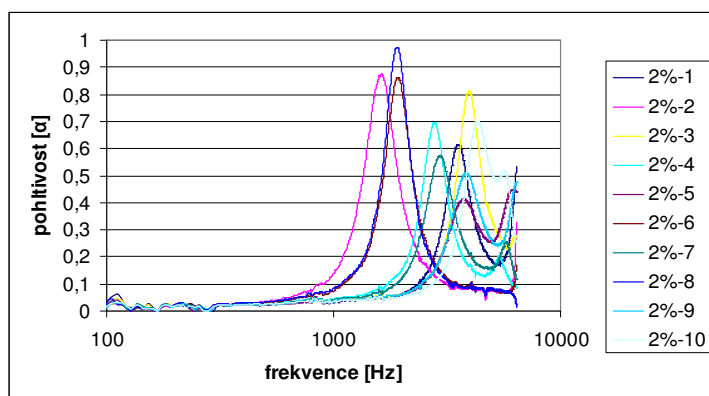
Tab. 6 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	2% 14.2.	2% 14.2.
Medián	3272	0,673672843
IS spodní	1711,54456	0,491061794
IS horní	4832,45544	0,856283891

Obr. 65 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 2% uhlíkových vláken v 3. týdnu měření

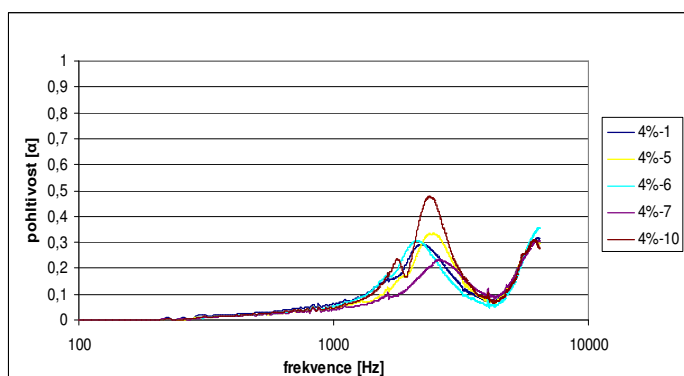
Tab. 7 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	2% 21.2.	2% 21.2.
Medián	3248	0,697328168
IS spodní	2061,499858	0,485886325
IS horní	4434,500142	0,908770011

Obr. 66 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 2% uhlíkových vláken v 4. týdnu měření

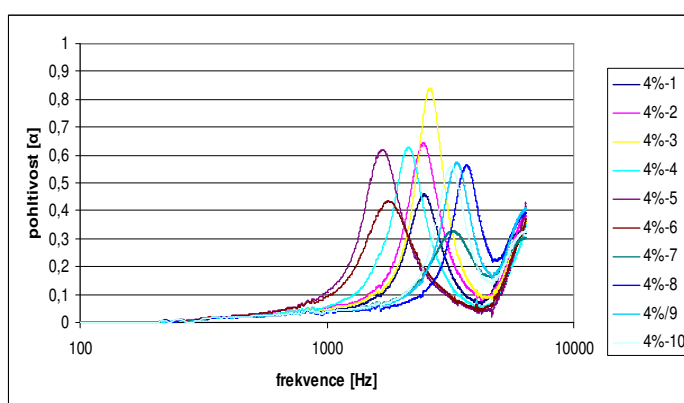
Tab. 8 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	4% 31.1.	4% 31.1.
Medián	2376	0,305219276
IS spodní	2047,353522	0,133066867
IS horní	2704,646478	0,477371685

Obr. 67 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 4% uhlíkových vláken v 1. týdnu měření

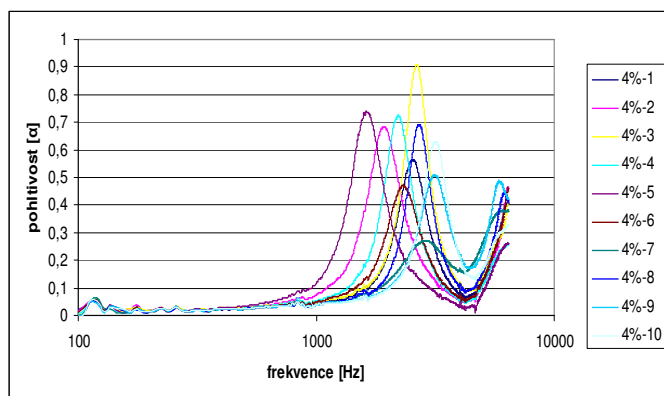
Tab. 9 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	4% 7.2.	4% 7.2.
Medián	2556	0,567620867
IS spodní	1646,503782	0,447637857
IS horní	3465,496218	0,687603877

Obr. 68 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 4% uhlíkových vláken v 2. týdnu měření

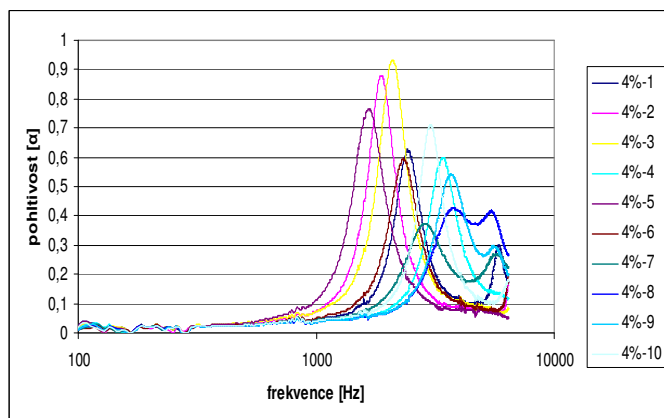
Tab. 10 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	4% 14.2.	4% 14.2.
Medián	2592	0,655532889
IS spodní	1890,256725	0,503971795
IS horní	3293,743275	0,807093983

Obr. 69 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 4% uhlíkových vláken v 3. týdnu měření

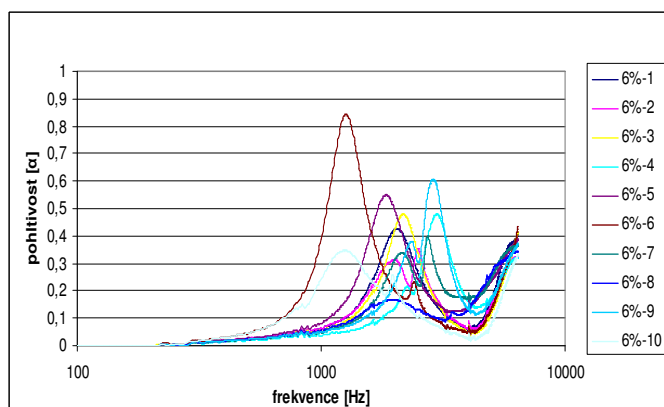
Tab. 11 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	4% 21.2.	4% 21.2.
Medián	2628	0,61407012
IS spodní	1593,852016	0,352560326
IS horní	3662,147984	0,875579914

Obr. 70 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 4% uhlíkových vláken v 4. týdnu měření

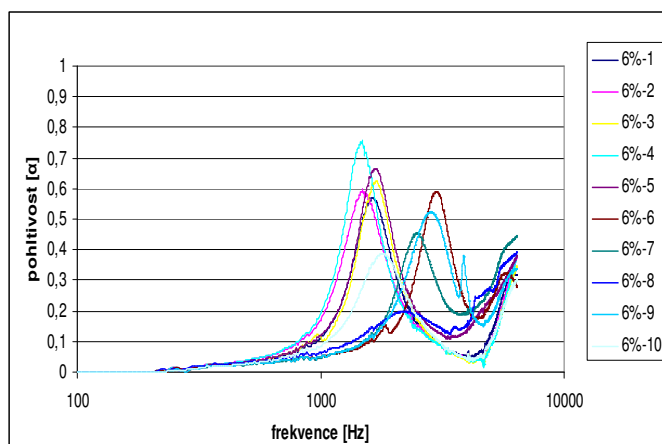
Tab. 12 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	6% 31.1.	6% 31.1.
Medián	2008	0,47874495
IS spodní	965,615877	0,07130225
IS horní	3050,38412	0,88618765

Obr. 71 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 6% uhlíkových vláken v 1. týdnu měření

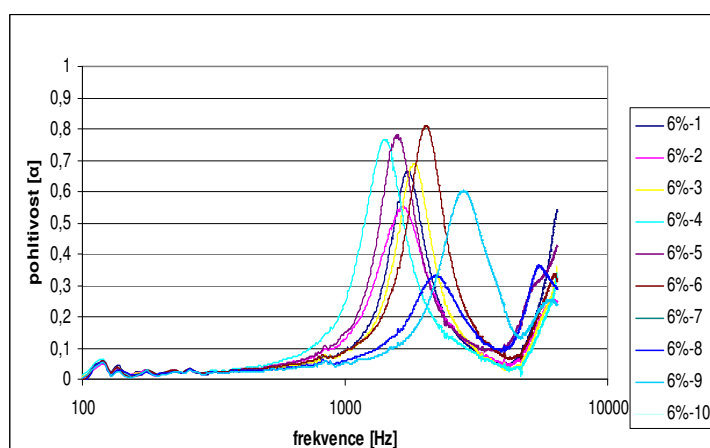
Tab. 13 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	6% 7.2.	6% 7.2.
Medián	1752	0,579615468
IS spodní	971,7722799	0,418670333
IS horní	2532,22772	0,740560602

Obr. 72 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 6% uhlíkových vláken v 2. týdnu měření

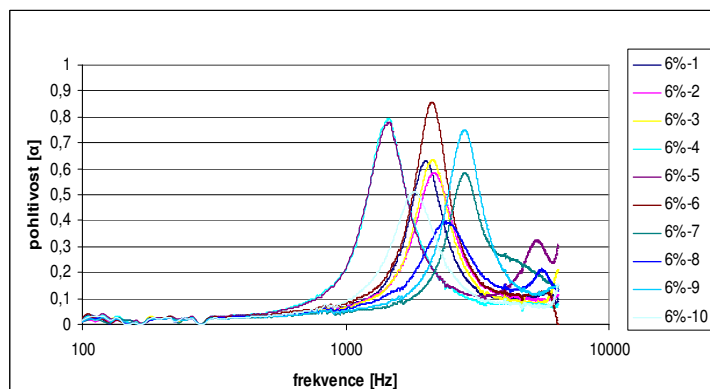
Tab. 14 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	6% 14.2.	6% 14.2.
Medián	1780	0,63316782
IS spodní	1424,51163	0,45080093
IS horní	2135,48837	0,8155347

Obr. 73 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 6% uhlíkových vláken v 3. týdnu měření

Tab. 15 Hodnoty pro graf IS



Robustní parametry		
Název sloupce	6% 21.2.	6% 21.2.
Medián	2132	0,6309053
IS spodní	1347,15555	0,4685568
IS horní	2916,84445	0,79325379

Obr. 74 Akustická pohltivost pro vzorky s obsahem 6% uhlíkových vláken v 4. týdnu měření

Příloha č. 3

Hodnoty naměřené na Ohmmetru

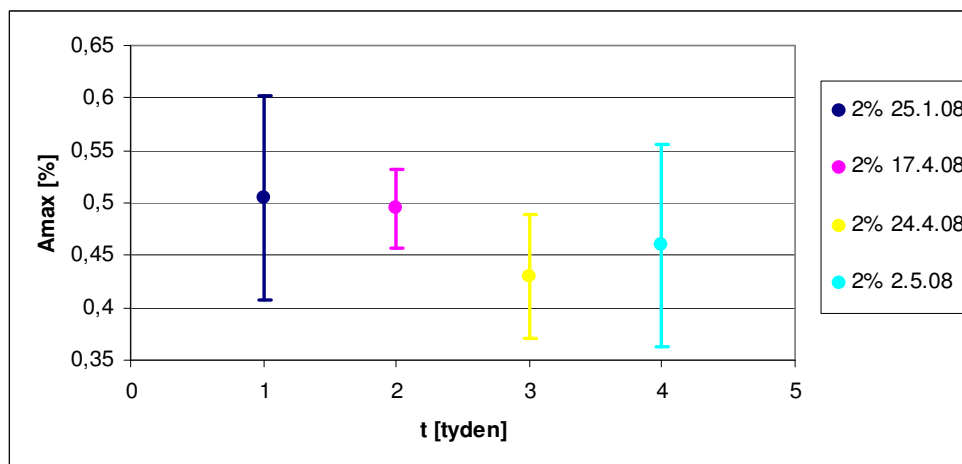
Tab. 16 Naměřené hodnoty rezistivity

		$\varphi=30\%$; $T=24\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varphi=25,2\%$; $T=24,7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varphi=23,5\%$; $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varphi=21\%$; $T=25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
		U=1 V	U=1 V	U=1 V	U=1 V
rezistence[Ω]					
T01-T015	1	2,1350E+08	7,1186E+07	2,1521E+08	1,2008E+08
(matrice)	2	6,2075E+07	1,5433E+08	5,2769E+07	1,0502E+08
	3	1,4048E+08	1,8984E+07	1,1356E+06	2,1420E+07
	4	4,7758E+07	1,9332E+08	7,7694E+07	6,8588E+07
	5	2,9693E+07	5,2762E+07	1,1186E+08	5,1305E+07
	6	1,1525E+07	7,8800E+07	2,8110E+07	3,6106E+07
	7	4,5077E+07	3,9363E+07	4,0156E+07	3,1611E+07
	8	2,7907E+07	5,5120E+07	7,9063E+07	6,8951E+07
	9	3,6188E+07	9,5342E+07	2,6220E+07	1,3345E+08
	10	1,3088E+08	5,2984E+07	1,5597E+07	1,4307E+08
	11	8,0625E+07	8,2251E+07	5,0667E+07	5,6177E+08
	12	4,5452E+07	5,9791E+07	3,4534E+07	3,5978E+07
	13	1,6720E+07	3,8347E+07	2,5866E+08	2,8663E+08
	14	1,6303E+07	2,9808E+07	1,5479E+08	1,1485E+08
	15	6,6783E+07	6,4886E+07	2,4354E+08	3,2922E+08
Průměr		6,4731E+07	7,2485E+07	9,2667E+07	1,4054E+08
T21-T215	1	7,4926E+07	1,4519E+06	1,0350E+06	4,7120E+05
	2	2,6219E+04	2,7844E+06	4,2348E+06	7,8904E+07
	3	1,8666E+07	1,6999E+06	9,4779E+06	4,3426E+06
	4	3,8820E+07	2,0828E+07	4,4011E+07	3,3129E+07
	5	5,2766E+07	2,3336E+06	7,9836E+07	4,3562E+06
	6	7,3478E+07	2,2503E+07	6,3490E+06	3,5749E+07
	7	2,4407E+07	1,2067E+06	1,0923E+07	2,0732E+07
	8	4,7573E+06	1,2293E+05	1,1235E+06	4,2793E+07
	9	6,8505E+07	4,9284E+06	1,2957E+07	7,5518E+06
	10	1,0221E+08	3,5642E+07	4,5817E+06	7,9231E+05
	11	1,6341E+07	7,9062E+07	9,6346E+07	3,2365E+07
	12	1,8162E+06	2,1556E+07	6,6285E+07	1,3169E+06
	13	1,7745E+08	2,1774E+07	4,4102E+07	3,1721E+07
	14	1,5967E+06	1,6690E+06	2,4521E+06	8,1511E+07

	15	2,7296E+06	1,4149E+07	3,0513E+06	6,3607E+07
Průměr		4,3900E+07	1,5447E+07	2,5784E+07	2,9289E+07
T41-T415	1	4,5850E+03	5,8355E+07	2,6710E+07	1,1089E+05
	2	5,4848E+06	8,9960E+07	9,4271E+04	4,9055E+06
	3	1,6308E+06	5,5403E+07	8,9207E+07	1,4759E+07
	4	4,6583E+06	6,9504E+07	4,5062E+06	5,4786E+06
	5	3,3456E+06	2,3663E+06	1,1406E+07	2,5715E+06
	6	4,3732E+06	2,1240E+07	5,8752E+05	2,8042E+06
	7	3,6326E+06	1,8718E+07	1,8028E+06	3,7253E+08
	8	3,9043E+06	1,2227E+07	6,1651E+06	8,2438E+06
	9	4,6254E+06	1,7004E+06	2,3103E+07	1,4943E+05
	10	9,3654E+04	6,9522E+07	1,0856E+08	2,4328E+07
	11	1,4254E+06	3,1187E+07	4,6361E+07	2,2110E+07
	12	3,8967E+06	9,1448E+06	1,6722E+07	2,9730E+06
	13	6,2035E+06	5,6007E+07	6,4032E+07	1,0691E+04
	14	2,3435E+06	2,7488E+06	3,0476E+05	1,2029E+04
	15	2,5239E+04	1,4145E+07	1,4144E+06	2,7050E+04
Průměr		3,0432E+06	3,4149E+07	2,6732E+07	3,0734E+07
T61-T615(?2)	1	5,9280E+06	2,5499E+07	2,1208E+07	6,5221E+05
	2	2,4818E+06	2,0958E+06	2,0865E+07	2,6356E+06
	3	2,0986E+07	2,3007E+08	4,0321E+04	1,3490E+07
	4	3,8195E+07	3,2281E+07	4,3094E+06	2,6251E+07
	5	6,6441E+05	8,4569E+07	2,8257E+07	2,7536E+07
	6	8,4336E+08	2,2652E+08	3,9540E+07	1,9609E+07
	7	6,1922E+06	4,2174E+05	3,1957E+07	2,4527E+07
	8	4,7749E+06	6,8648E+07	1,3509E+08	1,7224E+07
	9	1,1654E+08	2,9015E+07	2,5859E+07	2,7290E+07
	10	8,3339E+06	3,6177E+07	4,2517E+04	1,4764E+05
	11	2,4309E+05	2,1997E+07	3,2812E+07	1,2350E+07
	12	6,8196E+04	1,4710E+07	1,0821E+08	1,5928E+05
Průměr		8,7314E+07	6,4334E+07	3,7349E+07	1,4323E+07

Příloha č. 4

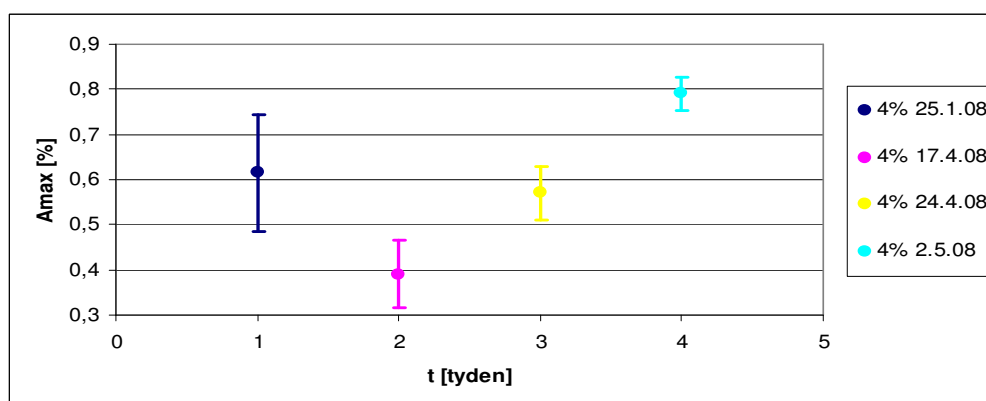
Grafy maximálního prodloužení do přetrhu



Obr. 75 Graf maximálního protažení do přetrhu u materiálů s 2% uhlíkových vláken

Tab. 17 Hodnoty pro konstrukci grafu pro 2%

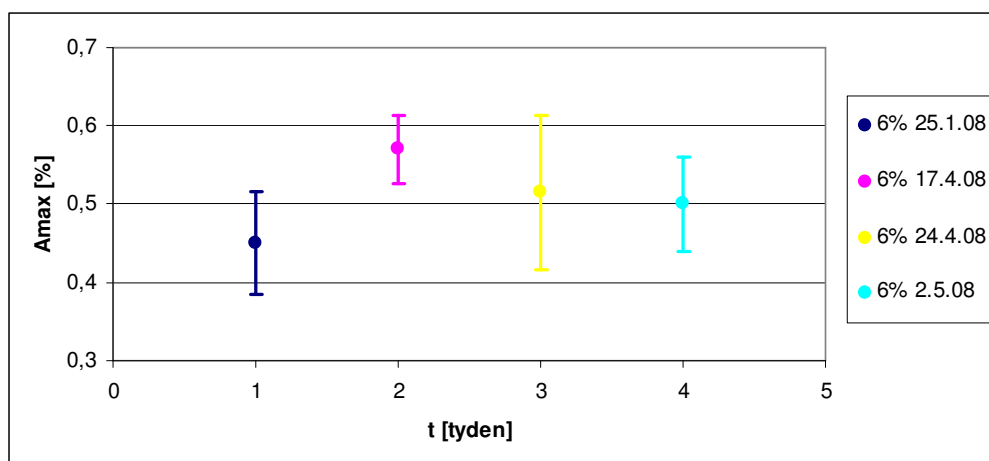
	25.1.	17.4.	24.4.	2.5.
	Max	Amax	Max	Amax
Medián	0,505	0,495	0,43	0,46
IS spodní	0,408119	0,457624	0,370795	0,363527
IS horní	0,601881	0,532376	0,489205	0,556473



Obr. 76 Graf maximálního protažení do přetrhu u materiálů s 4% uhlíkových vláken

Tab. 18 Hodnoty pro konstrukci grafu pro 4%

	25.1.	17.4.	24.4.	2.5.
	Max	Amax	Amax	Amax
Medián	0,615	0,39	0,57	0,79
IS spodní	0,485825	0,315248	0,510795	0,752483
IS horní	0,744175	0,464752	0,629205	0,827517



Obr. 77 Graf maximálního protažení do přetrhu u materiálů s 6% uhlíkových vláken

Tab. 19 hodnot pro konstrukci grafu pro 6%

	25.1.	17.4.	24.4.	2.5.
	Amax	Amax	Amax	Amax
Medián	0,45	0,57	0,515	0,5
IS spodní	0,38475	0,527123	0,417126	0,439814
IS horní	0,51525	0,612877	0,612874	0,560186